



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Casamento de Impressões Digitais Fotográficas Utilizando uma Representação Baseada em Banco de Filtros

Lécio Pery Júnior

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador
Prof. Dr. Alexandre Zaghetto

Brasília
2016



Casamento de Impressões Digitais Fotográficas Utilizando uma Representação Baseada em Banco de Filtros

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Prof. Dr. Bruno Luigi Macchiavello Espinoza Prof. Dr. Flávio de Barros Vidal
Universidade de Brasília Universidade de Brasília

Prof. Dr. Ricardo Pezzuol Jacobi
Coordenador do Curso de Engenharia da Computação

Brasília, 06 de dezembro de 2016

Dedicatória

É dever de um cristão dedicar à santíssima trindade. E tornou-se meu dever desde que recuperei o entendimento sobre a verdadeira essência da religião.

Quando eu estava "no fundo do poço" das minhas dificuldades mentais Alexandre Zaghetto, um amigo pessoal, foi o único capaz de ir além da pena ou da rejeição e oferecer a ajuda que precisava para a recuperação das minhas forças.

Desse processo participaram, enquanto eu cavava um retorno à glória antiga de minha infância, Ana Giulia ao assistir meu mundo se desmoronar e Glaucia, que tem visto ele ser reconstruído. Gostaria de ressaltar, Giulia, que eu demorei e estou demorando para entender suas palavras, mas certamente não as descartei. Obrigado por freiar minha derrocada até que pudesse me recompor da raiva e dos sentimentos que me faziam regredir.

A minha mãe frequentemente enfrentou dificuldades além de sua capacidade, superando-as para me ajudar. Esforços homéricos foram empregados.

*Já a minha irmã se deu ao trabalho de sacrifi... de gastar seu tempo de estudo para resolver **meus** problemas.*

Para essas duas o agradecimento não é um favor, é um mérito, uma obrigação.

Existem amigos e colegas. Dentre os amigos, que me serviram de âncora nos momentos de maior desgaste físico e mental, é imperativo citar algumas menções honrosas: André de Carvalho (na política, o meu e o teu são o nosso), Hugo Tadashi Kussaba (já foi ombro amigo, cadeira de rodas e muletas intelectuais, principalmente na matemática), Ayub Naser(mesmo com diferenças ideológicas ao menos me escuta), Francisco Neto (mesmo não sendo tão próximo, lê), ao Evanderson Mateus Santos Costa (eu mudei, mas você é uma constante na minha vida enquanto teu número for 9967[...]) e ao Alexandre Zaghetto(ter me ensinado que se importar com o trabalho não envolve apenas atenção à técnica).

Ao Bruno pelas suas críticas extremamente construtivas na minha banca. Tivesse feito essa dedicatória antes da apresentação certamente não poderia agradecer as dicas maravilhosas que me deu.

Há uma pequena lista de professores que sempre me incentivaram a continuar. Uma delas, é a Alba Cristina Magalhães, sempre tocando no assunto de tentar um mestrado.

Em algum momento, houveram atritos com a maioria dessas pessoas. Não interessa de quem é a culpa: se ela for minha eu coloco onde eu quiser. Como o sucesso é meu, a culpa é minha e eu prefiro colocar em cada um dos citados pelo meu sucesso.

Finalmente, aos heróis que me fizeram pequenos benefícios ao longo do tempo. Muito deles anônimos, outros conhecidos que eu nunca lembrarei mais que o rosto, não podendo citar por nome. Uma folha impressa na secretaria, um copo de água limpa após um envenenamento, uma exceção... tudo que amoleceu o meu coração de pedra. Uma vez dito isso, prolongar-se ainda mais sobre cada agradecimento é uma simples mistura de verborragia e demagogia: disse o essencial.

Agradecimentos

Agradeço essencialmente à UnB e seus departamentos. Em especial os de Matemática e Ciência da Computação. Departamentos de outras universidades foram creditados indiretamente à medida que seus pesquisadores são citados, sendo eles de diversas nacionalidades. Portanto, são creditados na bibliografia à medida de sua relevância para este trabalho.

Resumo

Embora métodos para casamento de impressões digitais obtidas por intermédio de aquisição com contato já foram amplamente estudados, ainda não se conhecem meios para casamento de impressões digitais obtidas sem contato. Para resolver tal problema, propõe-se uma metodologia para casamento de impressões digitais sem contato, baseada na abordagem FingerCode, por meio de banco de filtros de Gabor após operações de pré-processamento sobre imagens obtidas através de mecanismos de aquisição multivista. A metodologia foi cientificamente bem sucedida com uma taxa de ERR de 10.74%.

Palavras-chave: Biometria, casamento, banco de filtros, aquisição com toque, aquisição sem toque, Gabor, MIDAS, FingerCode.

Abstract

Even, though, matching between fingerprints obtained through touchbased acquisition methods had already been extensively studied, means for performing matching between fingerprints obtained through touchless acquisition methods are yet unknown. To solve this problem, a method is proposed, based on FingerCode approach, through Gabor filterbank after the execution of a pre-processing algorithm over images obtained through multiview acquisition. The methodology was scientifically successful with an ERR of 10.74%.

Keywords: Biometrics, matching, filterbank, touchbased fingerprinting, touchless fingerprinting, Gabor, MIDAS, FingerCode.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Apresentação do problema	1
1.2	Contexto e Motivação	1
1.3	Resumo da solução proposta	2
1.4	Descrição do documento	3
2	Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica	4
2.1	Processamento de imagens	4
2.1.1	Definição de Imagem	4
2.1.2	Amostragem e Quantização	5
2.1.3	Filtros	6
2.1.4	Filtro Sobel	7
2.1.5	Função normal de Gauss	10
2.1.6	Filtro Gaussiano	12
2.1.7	Filtro de Gabor	12
2.1.8	Convolução	13
2.1.9	Morfologia	14
2.2	OpenCV	15
2.3	Biometria	17
2.4	Confiabilidade ou erro estatístico	18
2.5	Impressões Digitais	20
2.5.1	Aquisição com contato	25
2.5.2	Aquisição sem contato	27
2.5.3	FlashScan3D	28
2.5.4	NEC Contactless Hybrid Finger Scanner - HS100	28
2.5.5	Touchless Biometric Systems(TBS)	29
2.5.6	Vantagens sobre a aquisição com contato	30
2.6	NBIS	31
2.6.1	MINDTCT	32

2.6.2 IMGTOOLS	33
2.7 Trabalhos Correlatos	34
3 Solução Proposta	36
3.1 Quadro resumo da metodologia	37
3.2 MIDAS	38
3.3 Center Finder	44
3.4 Cálculo do Desvio Padrão Médio Absoluto	55
4 Resultados Experimentais	59
4.1 Resultados	59
4.1.1 Resultado do MIDAS	59
4.1.2 Resultado do CenterFinder	59
4.1.3 Resultado das comparações	60
5 Conclusão	63
Referências	65
Anexo	67
I Filtros usados no CenterFinder	68
II Informações MIDAS	72

Lista de Figuras

2.1	Filtros de derivada de primeira ordem (Fonte: [6], com adaptações).	9
2.2	Filtros de Gabor sobre uma impressão digital. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: 0 – 157.5.	13
2.3	Exemplos de filtros 3×3 . Caso geral, Sobel (componente horizontal) e Gaussiana respectivamente.	14
2.4	Cristas e Vales.	20
2.5	Tipos de Centro (Fonte: [31], com adaptações).	23
2.6	Tipos de Minúcias.	24
2.7	Sensor ótico: (a) Diagrama; (b) Exemplar comercial.	26
2.8	Sensor de silício: (a) Diagrama; (b) Exemplar comercial.	26
2.9	Sensor ultrassônico: (a) Diagrama; (b) Exemplar comercial.	27
2.10	Exemplo do produto FlashScan3D.	28
2.11	NEC Contactless Hybrid Finger Scanner - HS100.	29
2.12	Tipos de leitores biométricos: (a) Três câmeras; (b) Cinco câmeras; (c) Exemplo de câmera da TBS.	30
3.1	Esquemático geral do sistema. As variâncias são as <i>features</i> .	37
3.2	Imagens extraídas diretamente das três câmeras da TBS.	39
3.3	Figuras do tipo <i>HT</i> e seus respectivos processamentos iniciais: (a) Tipo <i>HT1</i> ; (b) Tipo <i>HT2</i> ; (c) <i>HT1_{EN}</i> : equalização de histograma; (d) <i>HT2_{MINDTCT}</i> : saída do MINDTCT.	40
3.4	$NB = NOT(B)$.	41
3.5	Combinação entre <i>HT1</i> e <i>HT2</i> com seus respectivos realces.	42
3.6	Resultado do filtro passa baixas sobre <i>HT1_{ENM}</i> .	42
3.7	Processamento sobre <i>NB</i> : (a) <i>E</i> , resultado do uso do filtro Sobel sobre <i>NB</i> ; (b) <i>E_D</i> , resultado da dilatação sobre <i>E</i> .	43
3.8	Resultado final do MIDAS.	44
3.9	Imagem resultante da aplicação do MIDAS sobre as entradas <i>HT1</i> e <i>HT2</i> .	46
3.10	Tratamento inicial para obtenção do campo de orientações.	47
3.11	Máscara associada.	48

3.12	Orientação local das cristas.	50
3.13	Operação de <i>crop</i> na imagem original.	51
3.14	Operação de <i>crop</i> na imagem de orientação.	51
3.15	Operação de <i>crop</i> na máscara.	52
3.16	Imagem intermediária ε	52
3.17	Sobel sobre ε	53
3.18	Detecção de borda do campo de orientação normalizada.	54
3.19	Imagem binarizada.	55
3.20	Figura tipo HT0.. . . .	56
4.1	FingerCodes 0 – 157.5 da esquerda para a direita e de cima para baixo. . .	60
4.2	Gráfico dos Erros Tipo I e II. O ponto ERR corresponde à interseção dos dois.	61
4.3	Curva <i>Receiver Operating Characteristic</i> (ROC).. . . .	62
I.1	Filtro $f1$	69
I.2	Filtro $f1x$	69
I.3	Filtro $f1y$	69
I.4	Filtro $f2$	71

Lista de Tabelas

I.1	Kernels dos filtros $f1$ utilizados.	68
I.2	Kernel do filtro $f2$ de 32×32	70

Capítulo 1

Introdução

1.1 Apresentação do problema

O caso mais geral do problema de identificação do indivíduo envolve, naturalmente, ou diferenciá-lo de todos os outros, ou agrupá-lo em alguma categoria. De acordo com o livro *Biometric Systems*, técnicas estatísticas, particularmente as que utilizam padrões das impressões digitais, têm sido utilizadas para diferenciar ou conectar grupos de pessoas ou para conectar probabilisticamente pessoas a grupos, mas a biometria está interessada apenas em reconhecer pessoas enquanto indivíduos [1].

Assim, tomando o subcaso de identificar um indivíduo ao diferenciá-lo de todos os outros presentes em uma população, o ramo da Biometria é aquele que se predispõe a discutir estratégias para esse fim.

Este trabalho tem como objetivo empregar a estratégia biométrica que dá-se pelo casamento entre uma medida extraída do indivíduo alvo do processo de identificação e outra, cadastrada previamente, para fins de comparação.

As medidas são extraídas de imagens obtidas através do processo de aquisição multi-vista sem toque, que proporciona uma série de vantagens mas adiciona complexidade em relação ao processo tradicional. É na resolução dos problemas advindos dessa complexidade e na sugestão de um novo sistema que está o foco dessa dissertação.

1.2 Contexto e Motivação

Identificar pessoas e garantir a privacidade das informações são necessidades latentes desde o princípio das civilizações. Com base nesses preceitos foram desenvolvidos dispositivos que garantissem, dentro de seus limites, essa segurança, como cartões de crédito, chaves, documentos, senhas, informações particulares e dados pessoais.

Apesar de úteis, apresentam problemas originais e legítimos, pois as posses podem ser perdidas, furtadas ou falsificadas, e o conhecimento pode ser esquecido ou inferido por outrem. Essas vulnerabilidades têm sido, há muito, aproveitadas por fraudadores, gerando dessabores. Pela observação desses problemas, a utilização da caracterização biométrica, por meio das impressões digitais, surgiu como uma alternativa de identificação distinguindo pessoas mediante características humanas.

No Brasil a relevância é evidente [2] devido ao fato de que, no país, há vasto uso de mecanismos de identificação por impressões digitais até mesmo no processo eleitoral, em que é pioneiro, de forma que evoluiu estudos que adaptaram a tecnologia da urna eletrônica para comportar a identificação biométrica. Além de também iniciar o processo de implantação da Biometria no sistema do Seguro Desemprego [3].

O processo de aquisição de digitais deste projeto, tal qual a nova geração de dispositivos, estabelece-se como uma evolução das versões automatizadas tradicionais para a captura sem o contato físico com o sensor de digitais.

A vantagem dessa escolha é que devido à ausência de contato o método não deforma a impressão digital e é menos passível de ter seus resultados alterados por fatores externos como sujeira, suor, umidade, produtos sobre a superfície da pele e condições ambientais [4].

Além disso, a aquisição de imagens de impressões digitais é considerada a etapa mais crítica de um sistema de autenticação de impressão digital automatizada, pois determina a qualidade da imagem final da impressão digital, causando efeitos drásticos sobre o desempenho geral do software. Como o sistema sem contato prima por este desempenho, faz-se atraente as suas vantagens e justifica-se o uso neste estudo.

1.3 Resumo da solução proposta

Uma vez que o problema está claramente bem definido, é possível descrever a metodologia tomando o mesmo como ponto de partida e citar as dificuldades encontradas ao longo da execução de determinadas etapas à medida que são relevantes para o entendimento do processo de tomada de decisão.

A primeira etapa compreende na extração de imagens por intermédio do processo denominado Captura de Impressões Digitais Multivista. Trata-se de um procedimento realizado sem toque(touchless) que gera três imagens as quais, por sua vez, podem servir de entrada para diversos sistemas. No entanto, tais sistemas divergem dos tradicionais que não se adaptam a essa tecnologia.

A segunda etapa seria em encontrar o centro da digital. No entanto, a dificuldade

encontrada nela é resultante dessa má adaptação de algoritmos tradicionais de tal modo que sua aplicação não é possível em nenhuma das três imagens originais. Sendo assim, encontrar tal centro torna-se a terceira etapa, sendo a segunda correspondente à solução desse problema.

Desse modo, a segunda etapa é a utilização do algoritmo de pré-processamento MIDAS. Recebendo como entrada todas as imagens obtidas durante o processo de extração é gerada uma imagem resultante que, matematicamente, é parecida com as tradicionais.

É executada então a terceira etapa para encontrar o centro da digital e, em seguida a quarta, de tesselação(tessellation). Ela é realizada sobre uma das imagens originais - a que mais se aproxima do dedo e menos das amostras preto e branco. Nesse processo uma região no entorno desse centro é dividida em uma quantidade predefinida de subsetores que serão utilizados para a criação do vetor de features(feature vector).

Na quinta etapa, filtragens de Gabor e cálculos sobre as imagens resultantes, expressas em níveis de cinza, são efetuados gerando o vetor de features que formam o template da imagem, que por sua vez pode ser comparado com vetores de features provenientes de imagens candidatas.

A partir daí, com um simples limitante(threshold) e a distância euclidiana entre tais vetores é possível determinar, respeitadas as margens de erro, se qualquer imagem amostrada corresponde ao indivíduo cujo template foi registrado previamente.

1.4 Descrição do documento

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos e termos técnicos do campo da biometria e, em especial, do subcampo das impressões digitais. Os tópicos de processamento de imagem são apresentados de acordo com o necessário para o entendimento dos capítulos posteriores. Ainda são apresentados trabalhos correlatos e ferramentas utilizadas.

No Capítulo 3 é descrita a solução proposta de modo que fique clara a relação com os trabalhos apresentados no Capítulo 2, bem como em quais etapas as ferramentas são usadas. Em seguida, no Capítulo 4 são mostrados os resultados dessa metodologia quando aplicada por meio dos programas desenvolvidos, que por sua vez foram integrados em um sistema.

O Capítulo 5 trata-se das conclusões tanto sobre os resultados quanto sobre a metodologia. Com efeito, todas as limitações e possibilidades de expansão deste trabalho só podem ser discutidas à luz dos referidos resultados ou das possíveis melhorias sobre a solução proposta.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

2.1 Processamento de imagens

Uma explicação mais compreensível sobre o tópico do processamento de imagens pode ser obtida a partir de uma análise embasada nos fundamentos da matemática contínua embora, devido às limitações computacionais, a matemática discreta foi utilizada na obtenção de resultados por meio da filtragem espacial e operações similares.

Ainda será descrito, brevemente, a biblioteca utilizada - *OpenCV*.

2.1.1 Definição de Imagem

Uma definição de Imagem Digital é dada por Gonzalez [5]:

*"An image may be defined as a two-dimensional function, $f(x, y)$, where x and y are spatial (plane) coordinates, and the amplitude of f at any pair of coordinates (x, y) is called **intensity** or **gray level** of the image at that point. When x , y and the intensity values of f are all finite, discrete quantities, we call the image a **digital image**."*¹

Há uma relação entre imagens e sinais, embora a definição acima não seja enfática nesse quesito. Entender isso é fundamental para a compreensão de conceitos mais avançados, como filtragem, e também a matemática onde os processos de tratamento dessas imagens são embasados. Tal relação é explicada por Oppenheim [6]:

"Sinais são representados matematicamente como funções de uma ou mais variáveis

¹Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas (planas) espaciais, e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x, y) é chamada *intensidade* ou **nível de cinza** da imagem naquele ponto. Quando x , y e os valores de intensidade de f são todos finitos, quantias discretas, nos chamamos a imagem de *imagem digital*.

independentes. Por exemplo, um sinal de fala pode ser representado matematicamente pela pressão acústica como uma função do tempo e uma imagem pode ser representada pelo brilho como uma função de duas variáveis espaciais."

Assim, das definições de sinal e imagem acima decorre que os níveis de cinza são, na verdade, a representação matemática do brilho como uma função de duas variáveis espaciais. Fixado um par de coordenadas x e y e o nível $f(x, y)$, tem-se os chamados *picture elements*, *image elements*, *pels* ou *pixels* [5].

Diretamente das definições de imagem, sinal e *pixel* é nítido o fato de que uma *imagem digital* sempre terá um número finito de *pixels*, uma vez que as quantias que definem um *pixel* assumem infinitos valores na natureza mas que não podem ser todos capturados com os recursos computacionais disponíveis.

Como visto na seção anterior, a resolução corresponde à formalização da limitação dessa quantidade de valores (x, y) possíveis dentro de tais recursos, enquanto o alcance dinâmico equivale à limitação similar da quantidade de valores $f(x, y)$ possíveis de representação.

2.1.2 Amostragem e Quantização

Alguns desses recursos finitos, como memória e processamento, são considerados durante captura de um sinal para a geração de imagens digitais, que envolve os processos denominados amostragem (*sampling*) e quantização. Ainda segundo Gonzalez [5]:

*"An image may be continuous with respect to the x - and y -coordinates, and also in amplitude. To convert it to digital form, we have to sample the function in both coordinates and in amplitude."*²

Tradicionalmente, esse processo é feito definindo duas taxas de amostragem, $\lambda_x, \lambda_y \in \mathbb{N}$, e determina-se um subconjunto \bar{I} da imagem I da seguinte maneira:

$$I = \{f(x, y), \quad x \in [a, b], \quad y \in [c, d]\}$$

$$\bar{I} = \left\{ f(x_j, y_i), \quad x_j = a + \frac{j}{\lambda_x} \cdot (b - a), \quad y_i = c + \frac{i}{\lambda_y} \cdot (d - c), \quad 0 \leq j \leq \lambda_x, \quad 0 \leq i \leq \lambda_y \right\}$$

No entanto, \bar{I} ainda não corresponde à imagem digital visto que seus níveis de cinza possivelmente não estão de acordo com a percepção humana de cores. Ainda que o número de cores o qual o homem possa perceber seja da ordem de 10^{10} , certamente o olho humano não pode operar em uma faixa tão grande *simultaneamente* [5]. De modo mais enfático, ao observar uma sequência de imagens os níveis de cinza mais próximos tendem a

²Uma imagem pode ser contínua com respeito as coordenadas x e y , e também na amplitude. Para converter para o formato digital, nós temos que amostrar a função em ambas coordenadas e na amplitude.

tornar-se subjetivamente iguais se a escala de valores possíveis aumenta. A essa mudança atribui-se o nome de adaptação à luminosidade (brightness adaptation).

Desse modo, patamares de cores são escolhidos de forma que cada pixel da imagem digital D assume o nível de cinza correspondente ao grau mais próximo do valor do pixel da imagem intermediária \bar{I} :

$$D = \left\{ \overline{f(x_j, y_i)}, \quad x_j = a + \frac{j}{\lambda_x} \cdot (b - a), \quad y_i = c + \frac{i}{\lambda_y} \cdot (d - c), \quad 0 \leq j \leq \lambda_x, \quad 0 \leq i \leq \lambda_y \right\}$$

$$\overline{f(x_j, y_i)} = k \mid \min\{|f(x_j, y_i) - e|, \quad e \in E\} = |f(x_j, y_i) - k|$$

e E é o conjunto dos níveis de cinza permitidos. A notação utilizada por Oppenheim [6], para sinal discreto correspondente a um sinal contínuo $f(t)$, é $f[n]$. Adaptando o domínio e a imagem de f em D para adotá-la:

$$D = \{f[j, i], \quad j \in [a, b], \quad i \in [c, d]\}$$

É válido ressaltar que enquanto a amostragem baseia-se em uma taxa fixa para cada coordenada, os níveis de cinza permitidos são decididos por intermédio da escala logarítmica ou até mesmo a por meio de um critério subjetivo [5].

O que foi feito aqui é de suma importância pois mostra como uma imagem digital é, na verdade, um sinal bidimensional após uma amostragem e uma quantização. Portanto, na área de imagens é comum o procedimento de tomar a generalização de um filtro para o caso bidimensional e, em seguida, produzir seu análogo discreto com as devidas checagens de hipótese.

2.1.3 Filtros

Há grande facilidade em compreender operações em sinais contínuos definidos sobre domínio contínuo. Uma vez definido o processo de obtenção das imagens digitais, torna-se tentador trabalhar sobre o sinal antes da amostragem. Porém, isso nem sempre é possível e por esse motivo foi desenvolvida a matemática discreta.

Para cada operação matemática, portanto, é definido um filtro para sinais contínuos. Então, um estudo conduz à criação de um equivalente discreto que, por sua vez, aproxima os efeitos desejados sobre a imagem processada com uma margem de erro calculável. É interessante, ainda, atentar-se para a definição de filtros e o processo de filtragem em si mesmo que de forma breve.

Por razões históricas, convencionou-se a chamar a variável independente de uma função que representa um sinal de *tempo* [6]. No entanto, tais variáveis podem ser baseadas

em qualquer outro atributo quantificável, como no caso das imagens, onde a representação em sinais é embasada em vetores bidimensionais por meio dos *pixels*.

Exatamente por essa motivação histórica, o processo de filtragem foi concebido por intermédio da operação de convolução com sinais expressos em função do *tempo*, ficando esse procedimento denominado *filtragem no domínio do tempo*. Assim, a *filtragem espacial* de uma imagem também pode ser denominada, contraintuitivamente, *filtragem no domínio do tempo* e se difere da *filtragem no domínio da frequência*, definida adiante.

Há, no entanto, métodos para representar essas funções através de *séries*, conceito matemático para a soma de infinitos termos. Isso se torna conveniente no que tange aos sinais cujas funções não são fáceis de explicitar por outros meios. Uma das maneiras de representá-las é pelas somas ponderadas de exponenciais ou de senoidais - *séries de Fourier* - cujo caso unidimensional é apresentado:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(\omega_0 2\pi kt + \phi_0) + ib_k \sin(\omega_0 2\pi kt + \phi_0) \quad i = \sqrt{-1} \quad (2.1)$$

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \exp\{i\omega_0 2\pi kt + \phi_0\} \quad i = \sqrt{-1} \quad (2.2)$$

Cada senoidal ou exponencial acima possui uma frequência dada por $\omega_0 2\pi kt$ e os coeficientes a_k e b_k ou c_k correspondentes podem ser manipulados com uma multiplicação por outra função. Quando isso ocorre, diz-se que tal função é um filtro e que foi efetuada uma *filtragem no domínio da frequência*.

Assim, dadas essas definições, uma convolução no tempo equivale a um produto no domínio da frequência [6]. Foram omitidas informações sobre convergência das séries, mas as hipóteses para que isso ocorra geralmente são garantidas sobre sinais que se adequam a tais condições, como no caso das imagens.

Vale lembrar que a Equação 2.1 e a Equação 2.2 podem ser generalizadas para mais de uma dimensão - ou mais de uma variável independente. As convoluções associadas, em tempo contínuo e em tempo discreto, também podem ser expandidas. De fato, uma seção dedicada à convolução discreta para o caso bidimensional, onde é explicada em termos de algoritmo, foi criada com a finalidade de explicar filtros em *domínio do tempo*.

2.1.4 Filtro Sobel

Trata-se de um filtro linear de suavização com os coeficientes estrategicamente escolhidos para obter taxas de variação em relação às direções horizontal e vertical da imagem. Para que haja compreensão do tema, no entanto, é necessário estudar a generalização da operação matemática denominada *derivada*.

Essa segunda operação surgiu historicamente objetivando a determinação de taxas de variações de variáveis conhecidas. É uma noção que permeia o contexto de processamento de imagens quando, por exemplo, deseja-se saber de mudanças bruscas na tentativa de determinar contornos de superfícies ou fronteiras representadas na imagem.

Já está bem consolidado o conceito de derivada como uma transformação linear na área de Análise Real. De fato, é sempre possível aproximar uma função definida sobre os espaços vetoriais $(M, || \cdot ||)$ e $(N, || \cdot ||)$ da seguinte maneira [7]:

$$f: M \rightarrow N$$

$$\forall h > 0 : x + h \in M, f(x + h) = f(x) + Th + r(h)$$

onde T é uma transformação linear. Se as derivadas parciais existem e $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{r(h)}{||h||} = 0$ então há condições suficientes [7] para que a derivada exista e seja igual a T . Algebricamente:

$$f(x + h) - f(x) = T \cdot h + r(h) \quad (2.3)$$

$$\therefore \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x + h) - f(x)}{||h||} = T \frac{h}{||h||} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{r(h)}{||h||}$$

note que T é uma função que sempre pode ser definida por uma matriz, pois é uma transformação linear, sendo computacionalmente viável para diversas operações subsequentes.

Tomando as hipóteses de que a derivada da luz sempre exista para todos os pontos, $M = [a, b] \times [c, d] \subset \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ e $N \subset \mathbb{Z}$ espaços discretos resultantes de uma amostragem, da Equação 2.3 temos que, adotando a notação de função discreta:

$$f[x + h] = f[x] + Th + r[h], \quad x = (i, j)$$

onde $h = [x + h] - x$ é conhecido como *diferencial finito* no domínio e $f[x + h] - f[x]$ é o diferencial finito na imagem.

É válido notar que a divisão da imagem em *pixels* faz com que o conjunto dos valores possíveis para $||h||$ atinja seu ínfimo, 1, pois $h = 0 \Rightarrow f[x + h] = f[x]$ e $h \in \mathbb{N}$. Além disso, o fato de que tais *pixels* tenham dimensões distintas para largura e altura pode ser desconsiderado e a aproximação permanecerá razoável. Finalmente, $||h|| = 1 \Leftrightarrow h = (\pm 1, 0)$ ou $h = (0, \pm 1)$.

Como a derivada de uma função é, também, outra função para todo ponto em que está bem definida, e.g. $\lim_{||h|| \rightarrow 0} \frac{f(x+h)-f(x)}{h} = T \frac{h}{||h||} \Rightarrow Df(x) = Tx$; $Df = T$, se satisfizer as condições de derivabilidade para uma função, como no caso da luz, segue que podemos fazer a segunda da derivada f pela de T . O resultado será denominado *derivada de segunda ordem* de f .

Segundo Gonzalez [5], existem duas equações para filtros de primeira e segunda ordem, respectivamente, derivados do raciocínio acima:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x+1) - f(x) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1) + f(x-1) - 2f(x) \quad (2.5)$$

De fato, tomando a definição na Equação 2.4 e a notação de Oppenheim [6], temos:

$$\frac{d^2 f[x]}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{df[x]}{dx} \right) = \frac{d}{dx} (f[x+1] - f[x]) = \frac{d}{dx} f[x+1] - \frac{d}{dx} f[x]$$

$$\frac{df[x]}{dx} = f[x] - f[x-1]$$

$$\frac{df[x+1]}{dx} = f[x+1] - f[x]$$

e daí resulta exatamente a Equação 2.5.

Cientes de que as únicas direções permitidas são $h_x = (\pm 1, 0)$ e $h_y = (0, \pm 1)$ como já discutido, faz sentido afirmar que existem apenas duas derivadas direcionais e suas respectivas matrizes associadas. Essas matrizes podem ser vistas como o resultado de operações matriciais de convolução entre uma imagem de entrada I e um dos operadores D_x e D_y correspondentes às direções h_x e h_y . Pela linguagem de sinais e sistemas adotada por Oppenheim [6]:



Figura 2.1: Filtros de derivada de primeira ordem (Fonte: [6], com adaptações).

É nítido do diagrama acima que $D_x = \frac{d}{dn}$ e, analogamente, $D_y = \frac{d}{dm}$. Finalmente, é válido ressaltar que o caso contínuo da operação de convolução foge ao escopo deste trabalho. Convém, ainda, retomar o aspecto da derivada como taxa de variação, uma vez que os argumentos algébricos apresentados já construíram uma base sólida para justificar a existência do equivalente discreto. Em muitas situações surge, naturalmente, o interesse pelo conhecimento sobre as variações das grandezas estudadas, no caso a luminosidade. Em particular, algumas das mais importantes são o realce de aspectos específicos da imagem e a determinação de mudanças bruscas que ocorrem em contornos.

Na seção sobre morfologia será apresentado um operador matricial que realiza dire-

tamente a derivada discreta da Equação 2.4. O operador Sobel é dado pela expressão $G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$, onde G é a magnitude do gradiente e $G_x = \frac{1}{4}D_x[x, y] * X[x, y]$ e $G_y = \frac{1}{4}D_y[x, y] * X[x, y]$ são as componentes do filtro enquanto $*$ é o símbolo da operação de convolução.

2.1.5 Função normal de Gauss

Uma justificativa mais profunda sobre o filtro de Gabor é dada ao considerar a explicação originalmente dada pelo seu criador [8]. Ela possui argumentos muito mais profundos em relação à aplicabilidade dessa ferramenta, que ultrapassa largamente a área das imagens ar servir para modelar diversos fenômenos da natureza.

Uma versão reduzida dessa explicação, iniciando-se com a função normal de Gauss, foi apresentada com a finalidade de apresentar a utilização durante a obtenção dos resultados aqui apresentados. Antes de descrever tal uso do filtro de Gabor, portanto, faz-se conveniente iniciar uma descrição matemática a partir do método ingênuo (naive approach), ficando assim justificada a sua utilização na resolução do problema central deste trabalho.

Além disso, o Filtro Gaussiano também pode ser explicado partindo dessa A função $e^{-\frac{x^2}{2}}$ possui muitos usos e aplicações em diversos domínios, como na matemática, estatística e processamento de imagens. Isso se deve ao fato de possuir muitas propriedades que podem ser estudadas a partir de operações algébricas realizadas sobre ela.

Dentre essas operações, é de particular interesse a integração. A integral é uma classe de operações matemáticas criada, inicialmente, com a finalidade de medir a área abaixo do gráfico de uma função e remonta às discussões sobre cálculo de áreas na Grécia antiga na época de Arquimedes [9].

Existem as integrais definidas e indefinidas. As definidas possuem critérios para, dada uma função $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, ser possível calcular seu valor. Como exemplo, temos as integrais de Riemann, Lebesgue, Riemann-Stieltjes e Henstock–Kurzweil. Caso os critérios não sejam satisfeitos, o valor obtido não significa realmente a área embaixo da curva, visto que as hipóteses matemáticas foram violadas.

Devido a isso, seria conveniente calcular a integral indefinida ou antiderivada. Pelo Teorema Fundamental do Cálculo [10], sabe-se que

$$\int_a^b \frac{d}{dx} f(x) dx = F(a) - F(b)$$

e, portanto, a integral também pode ser vista como a operação inversa da derivada, ou uma antiderivada. Assim, encontrando uma função $\bar{F}(x)$ denominada primitiva, tal que

$\overline{F}'(x) = f(x)$, seria possível ter $F(x) = \overline{F}(x) + c(x)$, $c(x) = c \forall x$ e:

$$\int_a^b \frac{d}{dx} f(x) dx = F(a) - F(b) = \overline{F}(a) + c(a) - \overline{F}(b) - c(b) = \overline{F}(a) - \overline{F}(b)$$

$$\therefore F(x) = \int f(x) dx + C(x), \quad C(x) = C \forall x$$

e o valor de c seria determinado através da condição inicial $F(0)$.

Porém, não é possível encontrar uma $F(x)$ para a função $f(x) = e^{-\frac{x^2}{2}}$. Em Álgebra Computacional (Computer Álgebra) há o algoritmo de Risch, o qual transforma o problema de integração em um de álgebra, tentando expressá-la em termos de funções elementares como senos, polinômios e exponenciais se possível, falhando caso não exista representação equivalente. Assim, para a Função Normal de Gauss não há primitiva [11].

Desse modo, o único meio de obter $I = \int_a^b e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ é por intermédio das integrais definidas. Como exemplo, temos a integral de Riemann, onde a checagem de sua validade é feita através do Critério de Lebesgue [7, 12]. Para calculá-la, um dos possíveis métodos é valendo-se de uma técnica em que se calcula primeiro I^2 como sendo, pelo teorema de Fubini [7]:

$$I^2 = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \right) \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2}} dx dy$$

$$x = r \cos(\theta), \quad y = r \sin(\theta), \quad dx dy = r dr d\theta$$

$$\therefore I^2 = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} e^{-\frac{r^2}{2}} r dr d\theta = \left(\int_0^{2\pi} d\theta \right) \left(\int_0^\infty \left(e^{-\frac{r^2}{2}} \right)' dr \right) = 2\pi$$

$$\therefore I = \sqrt{2\pi}$$

A importância da finitude dessas integrais remete à checagem de hipótese e validade dos núcleos de filtros, como o Gaussiano e o de Gabor, gerados pela generalização dessa função.

De fato, a operação de convolução contínua é dada por uma integral onde, para um sinal constante, a integral viria a divergir causando falhas no sistema. Isso é válido também para as generalizações que serão vistas posteriormente. Finalmente, a convolução discreta é algebricamente limitada pela integral contínua em módulo e isso garante que qualquer filtragem não irá divergir.

Generalização da Função normal de Gauss

Pode-se generalizar a função normal de Gauss adicionando diversos coeficientes e estendendo seu domínio dos reais para os complexos. Nesse caso, convém substituir $e(x)$ pela exponencial complexa $\exp(z)$:

$$f(x) = a \cdot \exp\left\{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right\}$$

O parâmetro a é a altura do pico da curva, b é a posição do centro do pico, e c controla a largura do "sino". Sendo σ o desvio padrão, μ a média e tomando $a = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, $b = \mu$, $c = \sqrt{\sigma}$.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma}\right\}$$

2.1.6 Filtro Gaussiano

Pode-se generalizar a Função normal de Gauss, ainda, para múltiplas coordenadas sendo de interesse o caso bidimensional como sendo o produto de duas funções normal:

$$g(x, y) = f(x) \cdot f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma}\right\} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma}\right\}$$
$$\therefore g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2 + (y-\mu)^2}{2\sigma}\right\}$$

Note que μ e σ é o mesmo para as duas dimensões. De modo geral, toma-se $\mu = 0$ e $\sigma = 1$ mas isso não é obrigatório. Esse caso particular foi tomado na metodologia aqui apresentada, de sorte que o núcleo do filtro é:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma}\right\} \quad (2.6)$$

2.1.7 Filtro de Gabor

Sua generalização é dada de outra maneira. Na realidade, como é válida a relação de Euler onde $e^{ix} = \cos(x) + i \cdot \sin(x)$, $i = \sqrt{-1}$, segue a seguinte generalização da função normal de Gauss para gerar o filtro de Gabor:

$$f(x, y, \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) = \exp\left\{-\frac{x'^2 + \gamma y'^2}{2\sigma^2}\right\} \exp\left\{i\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \psi\right)\right\} \quad (complexa) \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}
f(x, y, \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) &= \exp\left\{-\frac{x'^2 + \gamma y'^2}{2\sigma^2}\right\} \cos\left\{2\pi\frac{x'}{\lambda} + \psi\right\} \quad (\text{real}) \\
f(x, y, \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) &= \exp\left\{-\frac{x'^2 + \gamma y'^2}{2\sigma^2}\right\} \sin\left\{2\pi\frac{x'}{\lambda} + \psi\right\} \quad (\text{imaginária})
\end{aligned} \tag{2.8}$$

e em ambos os casos, $x' = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta)$ e $y' = -x \cdot \sin(\theta) + y \cdot \cos(\theta)$. Nesta dissertação a componente real foi utilizada em um dos passos. Os parâmetros utilizados foram os sugeridos por Salil e que, por sua vez, foram determinados experimentalmente ao invés do uso de um algoritmo que encontra o ponto ótimo.

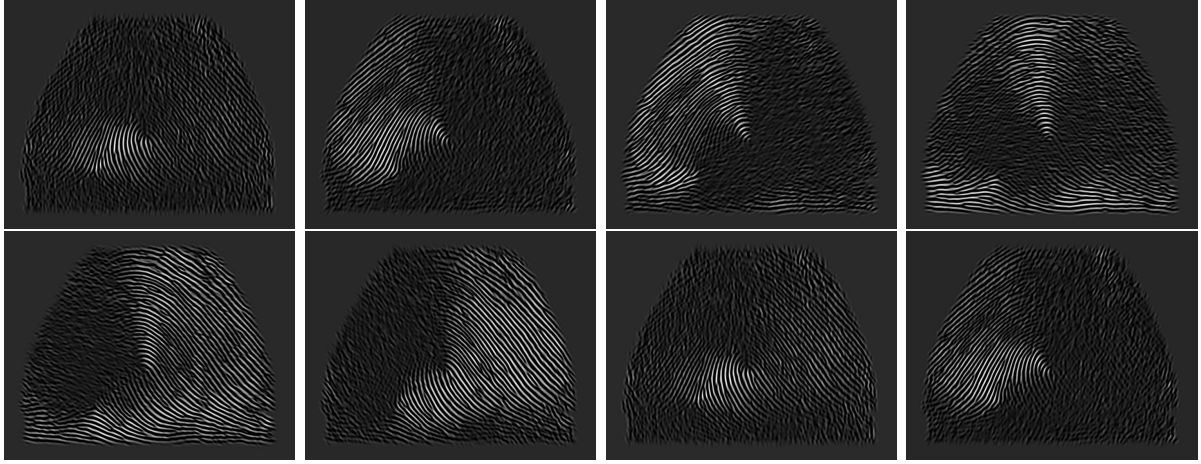


Figura 2.2: Filtros de Gabor sobre uma impressão digital. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: $0^\circ - 157.5^\circ$.

2.1.8 Convolução

Quando há interesse em filtragem espacial, em especial na resposta característica R , faz-se conveniente escrevê-la como uma soma de produtos ([5], com adaptações):

$$R = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \omega_{xy} z(x, y) \tag{2.9}$$

onde ω_{xy} são os coeficientes de uma matriz $m \times n$ e $z(x, y)$ são os níveis de cinza de uma imagem z . Tal matriz denomina-se *máscara* ou *operador* e, se rotacionada em 180° , representará uma convolução ou uma correlação em caso contrário. Assim, a equação acima representa um produto matricial entre uma imagem e um *operador*, representado na figura abaixo ao lado de alguns exemplos.

$$\omega = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \hline \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} \\ \hline \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} \\ \hline \end{array} \quad D_x = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline \end{array} \quad D_y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline 2 & 0 & -2 \\ \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline \end{array} \quad G_{auss} = \frac{1}{16} \cdot \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 2 & 4 & 2 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Figura 2.3: Exemplos de filtros 3×3 . Caso geral, Sobel (componente horizontal) e Gaussiana respectivamente.

Como já explicitado neste capítulo, há uma relação entre convolução no *domínio do tempo* e produto no *domínio da frequência*, de sorte que vale a equação [6]:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{f * g\} &= \mathcal{F}\{f\} \cdot \mathcal{F}\{g\} \\ \mathcal{F}\{f \cdot g\} &= \mathcal{F}\{f\} * \mathcal{F}\{g\} \\ f * g &= \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{f\} \cdot \mathcal{F}\{g\}\} \\ f \cdot g &= \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{f\} * \mathcal{F}\{g\}\} \end{aligned} \tag{2.10}$$

onde \mathcal{F} trata-se da transformada de Fourier, uma função bijetiva para todo ponto que está definida.

As implicações desse fato, no contexto de imagens, são que para toda função correspondente ao núcleo de um filtro no domínio da frequência, existe uma única matriz equivalente no domínio do tempo tal que as duas filtragens levarão à mesma imagem de saída. Como exemplo, temos que um filtro passa-baixas na frequência, que "retira" da imagem resultante todos os coeficientes cujas senoidais possuem frequências acima de uma determinada cota, é igual a um filtro de média correspondente a uma matriz onde todos os coeficientes possuem o mesmo valor.

A matriz da convolução espacial pode ter qualquer dimensão menor que a matriz que representa a imagem. Se sua dimensão é $m \times n$ e todos os coeficientes são $\frac{1}{mn}$ então trata-se de um filtro de média padrão. Variando o valor de alguns desses coeficientes, então é possível produzir um filtro de média ponderada. Desse ponto de vista, as componentes do filtro Sobel, correspondentes à derivada, são um exemplo de dimensão 3×3 multiplicados por uma constante, $\frac{1}{4}$.

2.1.9 Morfologia

Embora apenas uma única erosão seja realizada no algoritmo usado para encontrar o centro da digital, o MIDAS utiliza uma dilatação. Ademais, há uma relação íntima entre os tópicos de filtragem espacial e morfologia. Por esses motivos, um breve comentário é dedicado ao tema.

A principal finalidade dos filtros morfológicos é a remoção de ruídos, realce ou redução

do contraste e efeitos similites. Os que foram utilizados aqui são os de média erosão e dilatação. Optou-se por omitir as matrizes relacionadas à convolução e os filtros em frequência correspondentes. Ao invés disso, uma definição de Morfologia é apresentada aqui, e um método de implementação é introduzido na próxima seção.

Morfologia trata-se de um ramo da matemática que estuda a extração de componentes e descrição de objetos em imagens. Desenvolvida inicialmente para imagens binárias por Jean Serra e Georges Mathreon e estendida posteriormente para imagens em níveis de cinza, tem a finalidade de obter informações sobre a topologia de um conjunto, conhecido ou não, por meio de outro previamente conhecido e denominado *elemento estruturante*.

As equações para obter imagens $A \ominus B$ e $A \oplus B$, respectivamente as erosão e dilatação de A por meio do elemento estruturante B , definindo essas operações como sendo parte do Processamento Morfológico, são:

$$A \ominus B = \{x \mid (B)_x \subset A\} \quad (2.11)$$

$$A \oplus B = \{z \mid \hat{B} \cap A \neq \phi\} \quad (2.12)$$

onde \hat{B} é a reflexão do conjunto B , ou seja, $B = \{x \mid x = -b, b \in B\}$.

Finalmente, é válido explicitar a relação entre morfologia e filtragem espacial. Sabe-se que filtros de média estão encaixados em ambas categorias e esse fato sugere uma relação entre elas. De fato, essa relação é confirmada à medida que existem formas de obter os efeitos de filtros morfológicos com combinações de filtros espaciais e, por sua vez, filtros no domínio da frequência.

2.2 OpenCV

O OpenCV, segundo seu manual [13], é definido como:

*"OpenCV (Open Source Computer Vision Library: <http://opencv.org>) is an open-source BSD-licensed library that includes several hundreds of computer vision algorithms. The document describes the so-called OpenCV 2.x API, which is essentially a C++ API, as opposite to the C-based OpenCV 1.x API. The latter is described in [opencv1x.pdf](#)."*³

Neste trabalho, o módulo MIDAS foi desenvolvido em OpenCV 1.6 na linguagem, enquanto os módulos CenterFinder e de cálculo das texturas(variacional) foram realizados em OpenCV 3.0 em C++. O sistema completo é compatível com plataforma Windows x64 uma vez que OpenCV possui bibliotecas de link dinâmico tanto para plataformas x32

³OpenCV(Open Source Computer Vision Library: <http://opencv.org>) é uma biblioteca de código aberto e licenciamento BSD que inclui várias centenas de algoritmos de visão computacional. O documento descreve a API conhecida como OpenCV 2.x, que é essencialmente uma API C++, em oposição à API OpenCV 1.x baseada em C. Esse último é descrito em [opencv1x.pdf](#).

quanto para x64.

Em todas as suas versões, os algoritmos de Visão Computacional referenciados pelo manual são executados através de primitivas cuja implementação é frequentemente otimizada pela comunidade de software livre. As primitivas para erosão, dilatação e filtragem na frequência, em OpenCV 3.0, serão mostradas a seguir:

```
void erode(InputArray src, OutputArray dst, InputArray kernel, Point
    anchor=Point(-1,-1), int iterations=1, int borderType=BORDER_CONSTANT,
    const Scalar& borderValue=morphologyDefaultBorderValue());
void dilate(InputArray src, OutputArray dst, InputArray kernel, Point
    anchor=Point(-1,-1), int iterations=1, int borderType=BORDER_CONSTANT,
    const Scalar& borderValue=morphologyDefaultBorderValue() );
```

onde *src* é a imagem de entrada com um número arbitrário de canais, mas a profundidade *depth* tem de corresponder a uma das constantes CV_8U , CV_16U , CV_16S , CV_32F ou CV_64F , *dst* consiste na imagem de saída do mesmo tamanho e tipo de *src*, *element* é o operador utilizado para a erosão, sendo por padrão uma matriz 3×3 , *anchor* significa a posição da âncora dentro do elemento, tendo como padrão o valor $(-1, -1)$ e significa que está no elemento ao centro da matriz, *iterations* é número de vezes que a erosão é aplicada, *borderType* é o método de extrapolação de *pixel* e *borderValue* trata-se do valor de borda para o caso onde a borda seja constante.

Existe a função *createMorphologyFilter()* que se relaciona a essa última variável, mas que não será estudada porque foram utilizados os valores padrões. Finalmente, é bom ressaltar que a filtragem no domínio da frequência é efetuada com:

```
void filter2D(InputArray src, OutputArray dst, int ddepth, InputArray kernel,
    Point anchor=Point(-1,-1), double delta=0, int borderType=BORDER_DEFAULT )
```

onde *src* é a imagem de entrada, *dst* é a de saída com as mesmas dimensões, *ddepth* é a profundidade desejada da imagem de saída que, quando 1, equivale a mesma da imagem de entrada, *kernel* é o operador de correlação, ou de convolução se rotacionado previamente, *delta* é um valor adicionado a *dst* antes do fim execução da primitiva e os outros dois parâmetros, *anchor* e *borderType*, funcionam como no caso anterior.

2.3 Biometria

Autenticação biométrica ou Biometria, onde o segundo termo também é utilizado em um determinado ramo da Biologia [1], trata-se dos métodos de verificação ou reconhecimento da identidade de uma pessoa viva baseada em características fisiológicas ou comportamentais [14, 1].

Tais métodos requerem traços ou características biométricas bem definidas para que haja usabilidade. Há, então, a necessidade de estabelecer critérios para que uma biometria seja válida. Segundo diversos autores, como Silva [15], Anil K. Jain, Arun Ross e Salil Prabhakar [16], alguns dentre os critérios mais comumente reconhecidos como necessários são a universalidade(universality), unicidade, permanência, coletabilidade(collectability) e evasibilidade(circumvention). Baseado nos conceitos desses autores foram geradas as definições abaixo:

A premissa da universalidade, onde todos os usuários do sistema devem possuir tal característica, pode parecer trivial. Entretanto, se um número suficiente de usuários não possui a característica - por doença, hereditariedade, ocupação ou remoção deliberada - então esses não serão passíveis de identificação e o sistema se restringe aos que têm a característica.

Já o princípio da unicidade informa que a característica deve ser única em cada indivíduo, ou seja, quaisquer dois indivíduos não devem ser capazes de apresentar a mesma formação para a característica em questão. Não deve ser confundida com a distintividade, cujo conceito será explicado posteriormente.

Outrossim, o postulado da permanência retrata que a característica não deve variar com condições externas ou ao longo do tempo. Embora seja impraticável ao longo de toda a vida dos indivíduos, é suficiente que seja válida em um tempo específico condizente com os requisitos do sistema e para um número suficientemente grande de tais indivíduos.

O axioma da coletabilidade indica que é necessário que seja possível a medição do traço biométrico em questão. Quanto mais baixa a viabilidade de coleta, maior a carestia do processo de medição. Se, além disso, tal traço possuir baixa permanência, a utilização do sistema biométrico a longo prazo pode tornar-se oneroso.

Finalmente, a proposição da evasibilidade remete à facilidade de se burlar o sistema biométrico. Embora também dependa do sistema, algumas características são mais fáceis de serem emuladas diante de um leitor, o que pode conduzir a fraudes. A título de exemplo, de acordo com as características biométricas citadas é mais fácil fraudar um sistema biométrico baseado na íris, com uma lente de contato, do que conhecer a medida da pigmentação da pele de um determinado sujeito com precisão suficiente, que possibilitaria simular uma derme.

Não é suficiente que os traços biométricos utilizados em uma dada biometria sejam

validados segundo as exigências acima, ainda é conveniente que as biometrias sejam avaliadas de modo qualitativo, a fim de que seja possível escolher dentre elas a que mais se adapta ao contexto de um sistema de software em desenvolvimento.

Objetivando isso, pode-se selecionar um grande número de qualidades e quantificar o desempenho de uma biometria por intermédio de grandezas adequadamente associadas a elas. Fundamentados nessa relação, trabalhos anteriores [17, 18] na área indicam que um sistema de autenticação biométrica ideal pode basear-se em cinco qualidades principais: robustez(robustness), distintividade(distinctiveness), disponibilidade(availability), acessibilidade(accessibility) e aceitabilidade(acceptability).

Métricas quantitativas para essas cinco qualidades foram desenvolvidas [19, 20, 18, 21, 22]. A robustez é medida através da Taxa de Falso Negativo (conhecida como Erro tipo I), que é a probabilidade de que uma amostra selecionada não se case(match) com a imagem do banco de dados correspondente ao usuário, pois a distintividade é medida pela Taxa de Falso Positivo (conhecida como Erro Tipo II) – a probabilidade de um casamento entre a amostra candidata e a imagem relacionada a outro usuário.

Devido a importância dos Erros Tipo I e II uma seção, mais voltada ao campo da biometria, será dedicada a esse assunto. As aplicações desse conhecimento possibilitam maior entendimento sobre os requisitos de um sistema de identificação biométrica.

Para as qualidades restantes, a métrica da taxa de falha no cadastramento mede a disponibilidade e representa a probabilidade de um usuário não conseguir providenciar uma amostra legível ao sistema durante tal cadastramento. Acessibilidade pode ser quantificada pela taxa de transferência(throughput rate) do sistema, que equivale ao número de indivíduos que podem ter suas identidades confirmadas em uma unidade de tempo, como minuto ou hora. Aceitabilidade é mensurada através da aplicação de um questionário sobre os usuários do sistema.

As primeiras quatro qualidades são inversamente proporcionais a suas medidas respectivas. Como exemplo, temos que uma alta Taxa de Falso Negativo é um indicativo de um baixo nível de robustez. Existem várias características biométricas que satisfazem tais qualidades com diferentes níveis de precisão em cada métrica, como DNAs, orelhas, faces, termogramas corporais (face, mão ou corpo inteiro), veias, geometria das mãos, marcha(gait), retina, iris, assinatura e voz.

2.4 Confiabilidade ou erro estatístico

Como já abordado, o sucesso de um sistema depende diretamente de suas qualidades e esse fator justifica o aprofundamento no estudo de certos índices de erro. Essas incorre-

tudes são medidas, geralmente, por porcentagem e são relacionadas principalmente com as robustez e distintividade.

Para início, é possível notar que o Erro Tipo I, também conhecido por Índice de Falsas Rejeições (FRR – False Rejection Rate), é medido pela circunstância de uma amostra não se casar com o template do mesmo indivíduo [23], isto é, pessoas autênticas e registradas são rejeitadas como se não fossem identificadas ou não verificadas.

Outra discrepância possível é o Erro Tipo II, ou Índice de Falsas Aceitações (FAR - False Acceptance Rate), que representa a probabilidade de uma amostra casar-se com um template de outro usuário [23], ou seja, o sistema confunde a identidade de um usuário com outro. Como exemplos temos quando indivíduos não cadastrados são autenticados como registrados por um sistema e quando um indivíduo registrado consegue ser legitimado como outro, o que pode ser caracterizado como fraude.

Amparado nesses equívocos os sistemas biométricos são elaborados considerando o nível de incômodo causado por eles. Dependendo do uso do sistema um tipo de erro pode ser mais efetivo que o outro. Erros do Tipo I, por exemplo, podem levar a grandes transtornos caso não haja uma saída alternativa quando o usuário é negado de utilizar um serviço que é seu, enquanto os Erros do Tipo II facilitam a existência de fraudes.

A aplicação do sistema e seu público-alvo norteiam o nível de permissividade da incidência dos Erros do Tipo I ou II. Por padrão, sistemas militares devem ser pouco tolerantes aos Erros do Tipo II (em virtude da alta necessidade de controle de acesso), ao passo que sistemas domésticos devem ser menos indulgentes com Erros do tipo I (devido à valorização da praticidade).

Embasado nesta ideia, credita-se grande importância na apuração destes erros para que o sistema tenha maior confiabilidade, o que ratifica ainda mais as avaliações das qualidades. Por sua vez, depois de elencadas segundo as necessidades do sistema, como feito na sessão anterior, baseiam-se nas métricas e torna-se possível aplicar pesos para cada uma de forma a priorizá-las. Essa etapa define os padrões de captura e de uso, dirige a implementação e o funcionamento dos sistemas.

Constantemente o insucesso na aquisição da imagem da impressão digital é erroneamente associado ao Erro do tipo I quando, em verdade, a aquisição deficiente ocorre cada vez que o sensor biométrico não recebe dados suficientemente inteligíveis. Se isso acontece, o sistema torna-se incapaz de tomar uma decisão autêntica. Como exemplo impressões muito sujas, cristas demasiado degradadas e ainda mau posicionamento da impressão digital [24].

2.5 Impressões Digitais

Impressões digitais humanas adequam-se satisfatoriamente aos parâmetros estabelecidos acima na maioria das situações, como será visto nessa seção. Também chamadas de datilogramas ou dermatóglifos, são o desenho formado pelas elevações (cristas) e depressões (sulcos, vales) da pele localizados nas mãos e nos pés dos seres humanos.

Por serem características diferenciadas em cada indivíduo, ou seja, são representações

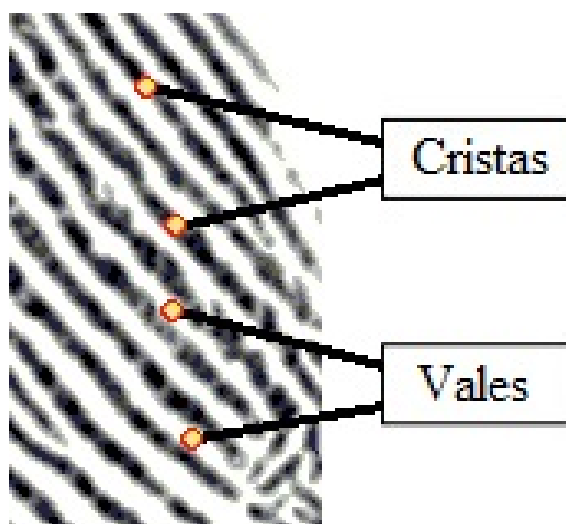


Figura 2.4: Cristas e Vales..

dérmicas das características genéticas, têm histórico antigo de uso para identificação de pessoas não só na análise forense, mas também para outros fins. Alguns exemplos incluem pesquisas na área de saúde [25], rendimento esportivo [26], controle de acesso a lugares e bancos de dados, várias aplicações civis, buscando o aumento de segurança e agilidade em sistemas financeiros, controle de ponto, eleições, obtenção de documentos, prevenção de terrorismo, entre outros.

Há relatos de adoção de impressões digitais para identificar pessoas que datam desde a Antiguidade durante o reino de Hamurabi (1792-1750 A.C.) na Babilônia, onde contratos eram selados com os dedos objetivando autenticar documentos ou selar acordos de naturezas diversas [27]. No entanto, a verificação das identidades por meio das impressões digitais foi criada por Sir Francis Galton, antropólogo e primo de Charles Darwin, no século XIX. Ele conseguiu demonstrar que as impressões digitais não variam ao longo do tempo de vida de um indivíduo, tendo como probabilidade de duas impressões serem iguais de um em um bilhão [28].

Segundo os trabalhos de Emiroglu e Akhan [29], o reconhecimento de impressões digitais é um dos mais importantes métodos de identificação biométrica, pois é atualmente o mecanismo que tem o tratamento mais barato, rápido e possui alta aceitabilidade. É

embasado em uma característica biométrica que, em condições específicas, pode manter-se desde a formação intrauterina e acompanhar a pessoa até a morte sem apresentar mudanças significativas. E para efeito, ainda que ocorram degradações habituais com a passagem dos anos, já existem tecnologias capazes de rebaixar os efeitos negativos destas mudanças na utilização dos sensores de impressões digitais.

Esse conjunto de fatores torna sua utilização conveniente, o que justifica a razão pela qual é um dos tipos mais utilizados mundialmente [30] na identificação biométrica de pessoas e é base para o desenvolvimento deste trabalho.

Como muitas outras tecnologias baseadas em características biológicas humanas, esse é um método eficiente, porém, em determinadas hipóteses pode requerer maior cuidado, assim, o presente trabalho atenta-se também na delimitação dos possíveis erros que podem ocorrer neste processo.

Este artigo atém-se à verificação das características nas falanges dos dedos das mãos dos indivíduos, que são as principais utilizadas pelos dispositivos de obtenção e identificação de impressões digitais. As impressões digitais, para serem identificadas, requerem alguns parâmetros. Os principais segundo Maltoni [31], cujos conceitos subjacentes como *minúcia* ainda serão explicados, são os seguintes:

- Resolução: Indica o número de pontos ou pixels por polegada (dpi). 250 a 300 dpi é provavelmente a resolução mínima que permite algoritmos de extração para localizar as minúcias nos padrões de impressão digital.
- Área: O tamanho da área retangular detectada por um scanner de impressões digitais. Quanto maior a área, mais cristas e vales são capturados e mais distintiva torna-se a impressão digital.
- Número de pixels: Em uma imagem de impressão digital pode ser simplesmente derivado pela resolução e pela área de impressões digitais: um scanner trabalhando em r dpi, e com área dada por $altura(h) \times largura(w)$ em $polegada^2$, tem $rh \times rw$ pixels.
- Alcance dinâmico (ou profundidade): Denota o número n de bits usados para codificar o valor de intensidade de cada pixel. O número de cores possíveis é $c2^n$ onde c é o número de canais, igual a 1 em imagens preto e branco.

Na subseção de Amostragem e Quantização esse conceito aparecerá como um limitador para a quantidade de valores que podem ser representados computacionalmente, contrapondo a definição matemática de imagem enquanto *sinál* luminoso no mundo

concreto.

- Precisão geométrica: Normalmente é especificada pela distorção geométrica máxima introduzida pelo dispositivo de aquisição e expresso em percentagem para as direções x e y.
- Qualidade de imagem: Apesar de terem sido definidos os parâmetros de qualidade para uma biometria, não é fácil definir com precisão a qualidade de uma imagem de impressão digital em si, e é ainda mais difícil dissociá-la da qualidade intrínseca da própria característica biométrica. Tais qualidades podem ser alteradas por diversos fatores, como quando a proeminência do cume é muito baixa (especialmente para trabalhadores manuais e idosos), e os dedos estão muito úmidos ou ressecados.

Existem algumas formações baseadas no molde estruturado pelas cristas e vales, como o núcleo (core) que é um ponto que está localizado aproximadamente no centro da impressão digital e o delta, que é um ponto formado pela bifurcação de uma crista independente ou pela divergência de duas cristas paralelas. Portanto, é perfeitamente justificável estudar de forma aprofundada as definições relacionadas às cristas.

Para entender estas formações e ciente desses parâmetros, ao avaliar globalmente uma impressão digital deve-se considerar o padrão de cristas e vales bem como suas formas e regiões. Ainda, tais cristas possuem formas distintas classificadas em três tipologias, que também podem ser subdivididas: arco(*arch*), presilha (*loop*) e verticilo (*whorl*). Segundo Mizobuch, 2011, [32] as subdivisões incluem:

- Arco (*Arch*): Suas cristas não formam núcleos nem deltas. Ademais, entram por um lado, crescem fazendo uma pequena ondulação e saem pelo lado oposto;
- Arco angular (*Tented arch*): Tipo de arco que possui ao menos uma crista com grande curvatura, além da presença de um núcleo e um delta;
- Presilha esquerda (*Left loop*): Suas cristas entram pelo lado esquerdo, fazem uma curva e saem pelo mesmo lado. Possuem um núcleo e um delta, sendo que o delta fica sempre abaixo do núcleo;



Figura 2.5: Tipos de Centro (Fonte: [31], com adaptações).

- Presilha direita (*Right loop*): Difere da presilha esquerda somente pelo fato das cristas entrarem pelo lado oposto, ou seja, pelo direito.
- Verticilo (*Whorl*): Caracteriza-se pela existência de, pelo menos, uma crista que completa uma volta em torno do centro da impressão digital, além de poder existir dois núcleos e dois deltas. Por ser uma estrutura complexa, algumas classificações sugerem sua subdivisão em presilha dupla (double loop ou twin loop) e verticilo plano (plain whorl)

Esses padrões de imagens de impressão digital são analisados de acordo com um ponto de referência ou um ponto central, correspondente ao centro da singularidade. No entanto, há casos em que existem mais de um centro, como no verticilo. Nesses casos, o núcleo central é geralmente associado com o ponto de máximo da curvatura da linha da crista.

Outras características imprescindíveis são chamadas minúcias (*minutae*), também concernem aos padrões de impressão digital, referindo-se às várias maneiras como as cristas podem ser descontínuas, como exemplo, segundo Maltoni, 2009: [31]

- Terminação (*Ridge ending*): Final da crista;
- Bifurcação (*Bifurcation*): Divisão da crista em duas ou mais;
- Lago (*Lake*): União de duas bifurcações;

Tipos de Minúcias



Figura 2.6: Tipos de Minúcias.

- Crista independente (*Independent ridge*): Possui tamanho reduzido (crista quebrada);
- Ponto ou Ilha (*Point/Island*): Cristas tão pequenas que mais parecem pontos;
- Espora (*Spur*): Bifurcação e terminação de forma combinada;
- Cruzamento (*Crossover*): Duas ou mais bifurcações conectadas por um caminho.

O aperfeiçoamento destes sistemas de classificação, pesquisa e identificação de impressões digitais acontece de forma gradual desde o princípio. Partiu do processo manual para o automatizado, pois inicialmente a coleta das impressões digitais era feita utilizando tinta e papel, e posteriormente um scanner era utilizado para a aplicação da Biometria computadorizada, propiciando a possibilidade de comparar a impressão cadastrada e a obtida na ocasião.

No entanto, se não executada com cuidado, a técnica manual produzia imagens que incluíam regiões com informações deformadas devido à quantidade de tinta, além da dificuldade de armazenamento da grande quantidade de papéis gerados. As dificuldades desse processo favoreceram a busca por aprimoramento, sendo então, substituído por sensores digitais com toque e posteriormente, sem contato.

Para a obtenção das imagens das impressões digitais existem diversos tipos de sensores (ópticos, capacitivos, ultrassônicos, etc). Os sensores, em geral, efetuam a leitura do padrão de cristas da superfície do dedo e convertem o sinal analógico recebido em um

sinal digital, para que possa servir como base para manejo dos Sistemas Automatizados de Identificação de Impressões Digitais (IAFIS). Em via de regra, são dotados de um módulo de interface para comunicação com o dispositivo externo, como um computador.

Os conceitos necessários para entender a representação computacional e tratamento das imagens de impressões digitais, particularmente os tópicos de sinais e processamento de imagens, já foram apresentados no início do capítulo. Nesta seção, foram enfatizadas as características anatômicas de tais impressões. Cientes desses dois temas, é perfeitamente possível prosseguir para o estudo dos métodos de aquisição.

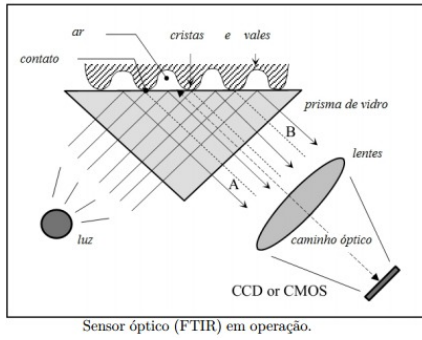
2.5.1 Aquisição com contato

Esse processo, denominado touchbased fingerprinting, consiste em posicionar e pressionar o dedo sobre a superfície do sensor gerando uma imagem plana em 2D representada em níveis de cinza. Outrossim, pode ser realizada pela rolagem do dedo, procedimento pelo qual é possível obter a visão ampla tanto do centro quanto dos lados da falange.

A técnica pode ser obstruída ou trapaceada devido às inconveniências que são essenciais à sua constituição, isso porque, pode-se configurar uma falha de segurança mediante a persistência de resíduos do dedo sobre a superfície de contato. Em vista disso, é passível a ação de um agente mal-intencionado que consiga reproduzir uma impressão digital válida utilizando estes resíduos [33].

Ademais, a projeção de um objeto 3D irregular (o dedo) sobre uma superfície plana pode induzir distorções e ruídos. É possível, portanto, uma variedade de reproduções para a mesma impressão digital bem como inconsistências na imagem capturada, que muitas vezes são irreproduzíveis e não uniformes. Esses fatores aumentam a complexidade do reconhecimento das impressões digitais e representam uma influência negativa sobre o desempenho do sistema [34].

Dentre os sensores baseados em toque, os mais comumente encontrados são ópticos ou Frustrated Total Internal Reflection (FTIR) [35], sendo mais antigos e mais utilizados atualmente para captura de impressões digitais. Sua utilização consiste no toque do dedo sobre a superfície de um prisma (vidro ou plástico), para que as cristas entrem em contato com a sua superfície, enquanto os vales se mantêm a uma certa distância, o que possibilita a ação da luz difusa que ilumina sistema pela parte interna do sensor. A reflexão dessa luz pelos vales se espalha aleatoriamente, mas as cristas a absorvem. Com isso, acontece a diferenciação das áreas competentes às cristas e aos vales, que é captada pela mediação de uma lente a um sensor de imagem CCD ou CMOS.



(a) Fonte: [31], com adaptações.

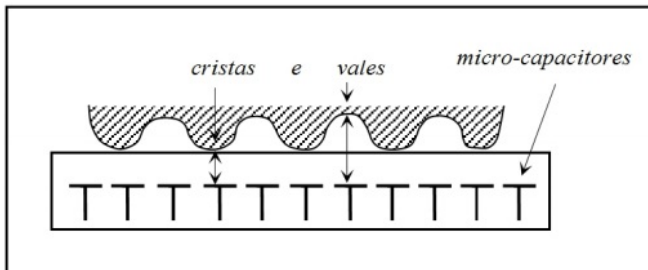


(b)

Figura 2.7: Sensor óptico: (a) Diagrama; (b) Exemplar comercial.

Quanto aos sensores de estado sólido (ou sensores de silício) [35], foram comercializados a partir da década de 90 com o objetivo de superar os problemas de custo e tamanho dos outros existentes, que por sua vez atrapalhavam a utilização massiva de sistemas biométricos baseados em impressões digitais.

Uma superfície de silício contém uma matriz de pixels, sendo cada qual um sensor minúsculo que ao ser tocado pelo dedo é capaz de diferenciar cristas e vales. Portanto, dispensa sensores de imagem CCD ou CMOS em contraposição aos anteriores. Desse tipo de sensor, pode-se salientar que existem quatro principais propostas para conversão do padrão de impressões digitais em sinais elétricos, sendo elas capacitiva, térmica, campo elétrico, e piezoelétricos [31].



(a) Fonte: [31], com adaptações.



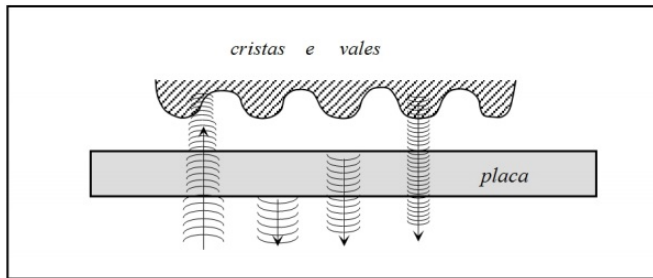
(b)

Figura 2.8: Sensor de silício: (a) Diagrama; (b) Exemplar comercial.

No entanto, os sensores ultrassônicos são como sonares baseados no envio de sinais acústicos para a falange pela a captura do sinal do eco, que permite calcular a distância ou profundidade da imagem da impressão digital. Possui dois componentes principais: um transmissor de pulsos acústicos e um receptor para a resposta obtida quando um pulso rebate na superfície da impressão digital.

Devido à sua natureza tem boa qualidade e é capaz de funcionar mesmo através de

luvas finas, além de resistente à pequenas sujeiras ou produtos sobre a superfície da pele. Apesar da dificuldade em fraudar os sistemas que os utilizam, os dispositivos com esta tecnologia são muito grandes, lentos na captura da imagem e dispendiosos em sua produção, o que dificulta seu uso generalizado.



(a) Fonte: [31], com adaptações.



(b)

Figura 2.9: Sensor ultrassônico: (a) Diagrama; (b) Exemplar comercial.

2.5.2 Aquisição sem contato

O denominado Touchless Fingerprinting consiste em posicionar o dedo em frente a um sensor sem tocá-lo, para que uma (ou mais) câmera(s) meça(m) a impressão digital por intermédio de imagens. Pela inexistência de contato físico com o sensor, este método não deforma a impressão digital, sendo menos afetado por fatores como sujeira, umidade e demais condições da pele e ambiente.

Existem duas possibilidades de implementação deste método, uma é aquisição 2D, com uma única câmera, no entanto, é importante citar que este método pode não capturar toda a digital, pois apenas um ângulo do dedo é utilizado. A outra é a aquisição multivista, que pode ser feita com três ou cinco câmeras posicionadas ao redor do dedo, conferindo um ângulo diferente para cada imagem gerada, criando uma imagem completa, por meio da sobreposição de imagens. [33]

Essas câmeras tentam superar os problemas da abordagem com contato supracitados, afinal, justamente pela falta deste toque em qualquer superfície rígida, a pele não se deforma durante a captura e a integridade da medida está assegurada. [34]

No entanto, esta tecnologia apresenta novos desafios. Por exemplo, o posicionamento do dedo afeta mais a qualidade da imagem, possuidora de um contraste menor, e a iluminação torna-se crítica durante todo o processo de aquisição.

Neste projeto foi seguida a abordagem da nova geração de dispositivos, que estabelece-se como uma evolução das versões automatizadas tradicionais para a captura sem o contato físico com o sensor de digitais, valendo-se de três câmeras.

Apresentar os produtos das empresas mais proeminentes, principalmente considerando a utilização do produto de uma destas marcas na geração dos resultados aqui apresentados, torna-se conveniente uma vez que o princípio básico de funcionamento foi explicitado.

2.5.3 FlashScan3D

FlashScan3D trata-se de uma companhia de aquisição de impressões digitais [36]. Dentre as especificações de produtos disponíveis, as de maior relevância são a tecnologia de sensores sem contato baseada em SLI (*structured light illumination*) que possibilita a extração da informação de profundidade das franjas, habilitando uma representação 3D da topografia do dedo. Outra característica apresentada pelo fabricante é compatibilidade com sistemas 2D. Não está claro, porém, como essa compatibilidade é garantida, nem se a tecnologia é multivista.

O site [36] não fornece informações detalhadas sobre o produto, mas há referências sobre a tecnologia na MIT Review, no U.S. Army e no Dept. Homeland Security.



Figura 2.10: Exemplo do produto FlashScan3D (Fonte: [36]).

2.5.4 NEC Contactless Hybrid Finger Scanner - HS100

As informações referentes a essa tecnologia podem ser encontradas no site [37]. Dentre as especificações, as de maior relevância são a multibiometria (impressão digital sem contato + vasos sanguíneos), a alta compatibilidade com os algoritmos de casamento de minúcias da própria NEC e compatibilidade com os principais softwares de acesso, incluindo o IBM Tivoli Access Manager Single Sign on e o Novell Secure Login.

Não foram encontradas informações a respeito do uso de tecnologia multivista ou compatibilidade com sistemas 2D.

Apenas a tecnologia da Touchless Biometric Systems apresenta, além da característica

de aquisição sem contato, a arquitetura multivista, possibilitando uma captura unha-a-unha.

Apesar do fabricante dizer ser capaz de oferecer versões de imagens 2D roladas equivalentes compatíveis com sistemas 2D, essa é uma característica que ainda carece de análise mais cuidadosa. Dentre as três tecnologias, a apresentada pela Touchless Biometric Systems parece, a primeira vista, ser a mais adequada aos propósitos de superar as desvantagens da aquisição com contato, incluindo o inconveniente do tempo de captura, além de potencialmente poder propiciar uma compatibilidade total com sistemas 2D.



Figura 2.11: NEC Contactless Hybrid Finger Scanner - HS100 (Fonte: [37]).

2.5.5 Touchless Biometric Systems(TBS)

Para produção dos resultados deste trabalho foi utilizado o serviço de uma empresa suíça. A mesma é caracterizada por trabalhar com recursos de segurança e sistemas de controle avançado de captação de impressão digital sem toque 3D, que tem sua confiabilidade embasada na vantagem tecnológica quando se trata de alta segurança ou de grandes grupos de usuários [38].

Especializada em sensores de biometria, desenvolveu e patenteou uma tecnologia sem toque multivista baseada em reflexão [39], ou seja, sua tecnologia comporta três câmeras posicionadas de maneira que compreendam a impressão digital de forma ampla e multiangular.

Pela câmera central, posicionada para capturar a porção central do dedo, capta-se as cores, bifurcações e deltas. Enquanto as demais captam as porções que circundam o centro a 45° , sendo uma no sentido horário e outra no sentido anti-horário [40]. Quando o dedo está posicionado corretamente, cada câmera fotografa simultânea a outra e posteriormente a imagem final é obtida a partir do mosaico formado das três imagens utilizando algoritmos de alinhamento [35].

O interesse por esse tipo de sistema tem sua origem nos fatores inovadores que estão, inclusive, em seus pressupostos, como a facilidade e rapidez em seu tempo de captura, a redução significativa de aquisições ruins e maior área de captura, dado que é uma vista panorâmica.

Como trata-se de uma tecnologia arrojada é incompatível com boa parte dos IAFIS convencionais, que têm suas bases de dados pontuadas com entradas de impressões digitais com toque e softwares de casamento específicos para esses sistemas. Já existem estudos inclinados sobre essa temática, que se tornou um campo em ascensão.

Para fins de pesquisa, nesta metodologia será aplicada a coleta de amostras sem toque por intermédio do leitor biométrico da TBS, modelo 3D Enroll.

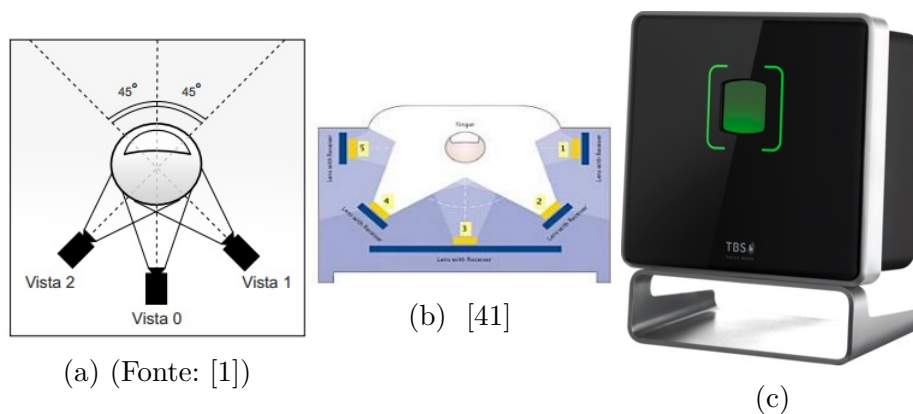


Figura 2.12: Tipos de leitores biométricos: (a) Três câmeras; (b) Cinco câmeras; (c) Exemplo de câmera da TBS.

2.5.6 Vantagens sobre a aquisição com contato

Enquanto a vantagem da aquisição com contato é ser, até este trabalho, a única metodologia possuínte de algoritmos de casamento para impressões digitais coletadas, existem diversas desvantagens relacionadas a qualidade da imagem quando comparadas com as obtidas por meio de aquisição com toque.

- Inconsistência entre Capturas: procedimentos usuais de captura automática de impressões digitais exigem que o usuário posicione ou role os dedos sobre um dispositivo de aquisição. O usuário deve aplicar certa força para garantir que as franjas toquem completamente a superfície de captura. Como consequência, a pele do dedo, dotada de propriedades elásticas, deforma-se e a impressão digital adquirida acaba sendo distorcida e inconsistente. Devido ao fato de não haver condições de controlar a intensidade e a direção da força empregada pelo usuário, são geradas múltiplas versões de impressões digitais do mesmo dedo a cada captura, dificultando a etapa

posterior de casamento para efeitos de identificação de um indivíduo.

- Impressões Digitais Latentes: o contato do dedo com o dispositivo de aquisição transfere para a superfície do mesmo sujeira, suor e gordura, imprimindo padrões de franjas dos dedos, gerando uma impressão digital latente que permanece impressa mesmo após a captura. Fazendo-se uso de ferramentas mecânicas ou químicas pode-se realizar uma cópia de uma impressão digital residual dessa natureza e criar uma réplica em látex, aumentando a vulnerabilidade do sistema. Impressões digitais latentes podem ainda influenciar em capturas de novas impressões digitais. Pode ocorrer de um novo usuário posicionar seu dedo sobre a superfície do dispositivo para realizar uma captura e parte da impressão digital latente de um usuário anterior se sobrepor a sua, gerando um modelo (template) errado para o usuário atual. Isso exige que o operador do sistema realize a limpeza do mesmo a cada captura.
- Contato não Uniforme: a captura seria perfeita se somente as franjas e não os vales estivessem em contato com a superfície de captura. Infelizmente, a secura da pele, franjas desgastadas, doenças de pele, suor, sujeira e umidade do ar geram distorções.
- Escorregamento do Dedo: a gordura da pele pode gerar um escorregamento do dedo durante o processo de aquisição, resultando em uma imagem borrada.
- Desgaste da Superfície de Contato: o contato contínuo com a superfície de captura pode desgastá-la com o tempo, gerando imagens degradadas.
- Presença de Halo: a diferença de temperatura entre a superfície de contato e o dedo pode resultar em um halo ao redor do dedo na imagem resultante.

2.6 NBIS

A distribuição do software da imagem biométrica (NIST Biometric Image Software - NBIS) é desenvolvida pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) para o Federal Bureau of Investigation (FBI) e o Department of Homeland Security (DHS), ambos órgãos do Governo Federal dos Estados Unidos no exercício de suas funções oficiais. Desde o final da década de 70 o FBI e o NIST tem um relacionamento promissor em busca de

capturar, armazenar e identificar impressões digitais. [42]

No início dos anos noventa, a agência desenvolveu um sistema para permitir o compartilhamento de impressões digitais entre as suas agências. A esse tipo de sistema nomeia-se Sistema Automatizado de Identificação de Impressões Digitais (Integrated Automated Fingerprint Identification System – IAFIS). Por meio dele conseguiu-se uma redução no tempo de resposta de pesquisas de meses para minutos.

A partir de então, o FBI debruçou-se sobre os estudos para o desenvolvimento de tecnologias no ramo, e em parceria com o DHS e o NIST, chegou ao NBIS. Não se sujeita à proteção de direitos autorais e foi desenvolvido como software livre, permitindo a coleta gratuita, integração, preservação e o compartilhamento de conhecimentos. Além disso, há uma equipe responsável por avaliar possíveis melhoramentos que porventura os usuários queiram partilhar.

No entanto, o NIST não assume qualquer responsabilidade pelo uso de outras partes de seu código-fonte ou servidor de código aberto, e não faz garantias, expressas ou implícitas, sobre sua qualidade, confiabilidade ou qualquer outra característica.

O objetivo das pesquisas, inicialmente, era de escopo criminal. No decorrer do desenvolvimento, os órgãos perceberam a grande usabilidade no campo civil e, em seu manual, alegam que suas áreas de uso é 50% criminal e 50% civil.

Esses empregos delinearão os caminhos do desenvolvimento do software. Ele é composto por alguns pacotes com técnicas de classificação de padrões de impressão digital e detecção de minúcias, além de convertê-las em imagens. São eles PCASYS, NFIQ, MINDTCT, AN2K, IMGTOOLS e IJG.

Deve-se notar que esses sistemas foram desenvolvidos independentemente uns dos outros de modo que, embora compartilhem etapas de processamento e seus usos possam ser complementares, os algoritmos podem ser aplicados de forma separada, abrindo espaços para o estudo individual de cada pacote. Dentre tais pacotes, dois deles foram utilizados neste trabalho: MINDTCT e IMGTOOLS (especificamente o CJPEGB).

2.6.1 MINDTCT

Com foco na identificação, propriamente dita, trata-se de um detector de minúcias que localiza e registra automaticamente as terminações do contorno do dedo e as bifurcações em uma imagem de impressão digital. Esse sistema inclui avaliação de qualidade precisa, baseada em condições de imagem local. É o único sistema gratuito de seu tipo.

A variação da qualidade da imagem dificulta a análise, principalmente no caso de impressões latentes. Para determinar a qualidade das imagens, pode-se usar como medida a determinação do fluxo direcional das cristas, o pequeno fluxo de cristas, as regiões de

baixo contraste e as grandes curvaturas.

Como esperado, dependendo destas medidas a confiabilidade do processo é comprometida porque a margem de erro sobre o cálculo das minúcias é elevado. Ainda que se extraíam as minúcias, a margem de erro dos cálculos envolvidos no processo será muito alta. Como a diferença entre imagens se torna muito grande, o casamento das impressões se torna inviável.

O MINDTCT trabalha por intermédio de criação de mapas direcionais. Este é um mapa de fluxo das cristas que, por objetivo, representa áreas da imagem com estrutura suficiente para a detecção de minúcias, ainda permanecendo capaz de sustentar a orientação geral das cristas e diminuir a descontinuidade da direção dos fluxos das cristas. [42]

2.6.2 IMGTOOLS

O outro pacote utilizado é, na verdade, uma grande coleção de utilitários de imagem de uso geral (IMGTOOLS). Sua principal finalidade é fornecer suporte ao processamento de imagens das impressões digitais. Os códigos-fonte fornecidos e utilizados neste trabalho são para Baseline JPEG, Lossless JPEG, codificadores e decodificadores de Wavelet Scalar Quantization(WSQ) do FBI. [42]

Similarmente são fornecidos utilitários para intercalação de componentes de cores, conversão de cores e de formatos de arquivos legados distribuídos em bancos de dados de impressões digitais NIST, além de dados de entrada para testes e impressão em tons de cinza.

Segundo o manual, nesse pacote a imagem é armazenada como um *pixmap*, imagem representada na memória em pixels, que em seguida é descompactado, comprimido usando o Baseline JPEG e o Lossless JPEG e finalmente [e compactado usando WSQ.

As bases de dados distribuídas pelo NIST são formatadas como NIST IHead usando JPEG Lossless ou compressão WSQ. A exibição dessas imagens é problemática porque os utilitários de visualização de imagens usuais não fornecem suporte a esse formato. Para contornar tal dificuldade, a solução é obtida pela utilização do pacote IMGTOOLS pois, com ele, os usuários conseguem converter arquivos de banco de dados legados do NIST em padrões compatíveis incluindo o JPEG Baseline, que possui suporte amplo.

O IMGTOOLS também contém uma coleção de codificadores e decodificadores de imagem. Um deles é o *cjpegb* que codifica arquivos JPEG Baseline, que é um formato compatível com a maioria dos visualizadores de imagens.

Para isso, o codificador reconstrói a imagem da placa de impressão digital a partir do conjunto de 14 imagens de impressão digital segmentadas e grava seu conteúdo em um novo arquivo. O arquivo de saída é composto apenas dos valores de *pixels* brutos para a

imagem do cartão de impressão digital. O tamanho da imagem do cartão de impressão digital é impresso na tela para que o usuário possa usar `cjpegb` e converter a imagem em um formato visível.

O utilitário toma como entrada um arquivo contendo uma imagem em escala de cinza ou cor (RGB) descompactada. São aceitos dois formatos de arquivo de entrada possíveis, arquivos NIST IHead e arquivos raw pixmap. Se um arquivo rawmap pixmap for compactado, seus atributos de imagem também devem ser fornecidos na linha de comando.

Uma vez lido na memória, o *pixmap* de tons de cinza ou cores é comprimido com perdas para um nível especificado de qualidade de reconstrução usando a biblioteca do Grupo Independente JPEG (IJG) para o JPEG Baseline (JPEGB). Os resultados JPEGB são gravados em um arquivo de saída. Observe que `cjpegb` evoca a biblioteca IJG em um modo de cor padrão onde uma das etapas de compactação inclui a conversão de espaço de cores de RGB para YCbCr e, em seguida, os planos de componente Cb & Cr onde é executada uma operação de decimação por um fator de 2 em ambas as dimensões.

Devido a essa conversão de espaço de cores, `cjpegb` só deve ser usado para compactar imagens em cores RGB. Os componentes de cor de pixels RGB em um arquivo de pixmap bruto podem ser intercalados ou não. Por padrão, `cjpegb` assume os pixels de cor entrelaçada. Ao registrar os pixmaps de cor, o formato de arquivo IHead do NIST suporta apenas imagens RGB entrelaçadas.

Quando são intercalados, os componentes de cor de um pixel (R) red, (G) green e (B) blue são sequencialmente adjacentes na corrente de bytes de imagem.

Se os componentes de cor não são intercalados, então todos os componentes R na imagem são sequencialmente adjacentes no fluxo de bytes de imagem, seguido por todos os componentes G e, em seguida, pelos componentes B. Cada sequência completa de componentes de cor é chamada de plano. [42]

2.7 Trabalhos Correlatos

É oportuno comentar que o trabalho desenvolvido por Salum [39] teve como objetivo desenvolver um método de compatibilidade entre impressões digitais com e sem contato. Trata-se de uma outra abordagem para resolver o problema de identificação por aquisição multivista onde, ao invés de trabalhar diretamente na imagem resultante das três câmeras, as imagens são comparadas com outras adquiridas previamente por pressão ou rolamento.

Já Zaghetto [40] idealizou um método para checar o mal-posicionamento dos dedos dos indivíduos durante o processo de aquisição, reforçando a confiabilidade de qualquer processamento póstumo ao estabelecer um padrão de qualidade para a extração. É, por-

tanto, a resolução um problema anterior ao tema central deste trabalho, mas possuinte de fundamental importância.

Anil [43] desenvolveu a abordagem *FingerCode*, valendo-se de um vetor de 640 *bytes* que contém informações locais e globais da impressão digital, para resolver as imprecisões do casamento realizado sobre minúcias. Usa um banco de filtros de Gabor e, para fins de comparação, uma simples distância euclidiana. Influenciou grandemente o terceiro módulo da metodologia.

Salil [44] desenvolveu um algoritmo que encontrar o centro da digital baseando-se não em minúcias, mas em regiões de alta curvatura. Trata-se do Estado da Arte em relação aos algoritmos existentes até a época de sua criação.

Tais *FingerCodes* já foram subsídios para outras pesquisas, também com a finalidade de realizar matching com impressões digitais, por meio de técnicas envolvendo redes neurais e *Fuzzy ARTMAP*(FAM) [45]. Embora aqui tenha-se usado apenas a distância euclidiana, como propôs Anil, essa metodologia pode ser avaliada em trabalhos futuros para tecnologias sem toque. Pode ser aplicado com vetores de 320 *bytes*.

Ainda sobre redes neurais, Adem [46] construiu uma rede neural artificial com a transformada *Contourlet*, hipótese também a ser analisada em trabalhos futuros sobre biometrias *touchless*.

Outro trabalho relacionado a *FingerCodes* é uma melhoria proposta por Lifeng [47] e que Salil utiliza durante o processo de normalização dos setores.

Finalmente, a integração entre múltiplos algoritmos de casamento foi estudada, para o caso de aquisição com toque, por Miao-li [48].

Capítulo 3

Solução Proposta

Antes de prosseguir para a metodologia em si, é conveniente a existência de um resumo prévio, com a finalidade de nortear a explanação sobre as operações realizadas. Por meio de um diagrama, é possível intuir uma noção geral sobre os algoritmos utilizados antes de seu detalhamento.

3.1 Quadro resumo da metodologia

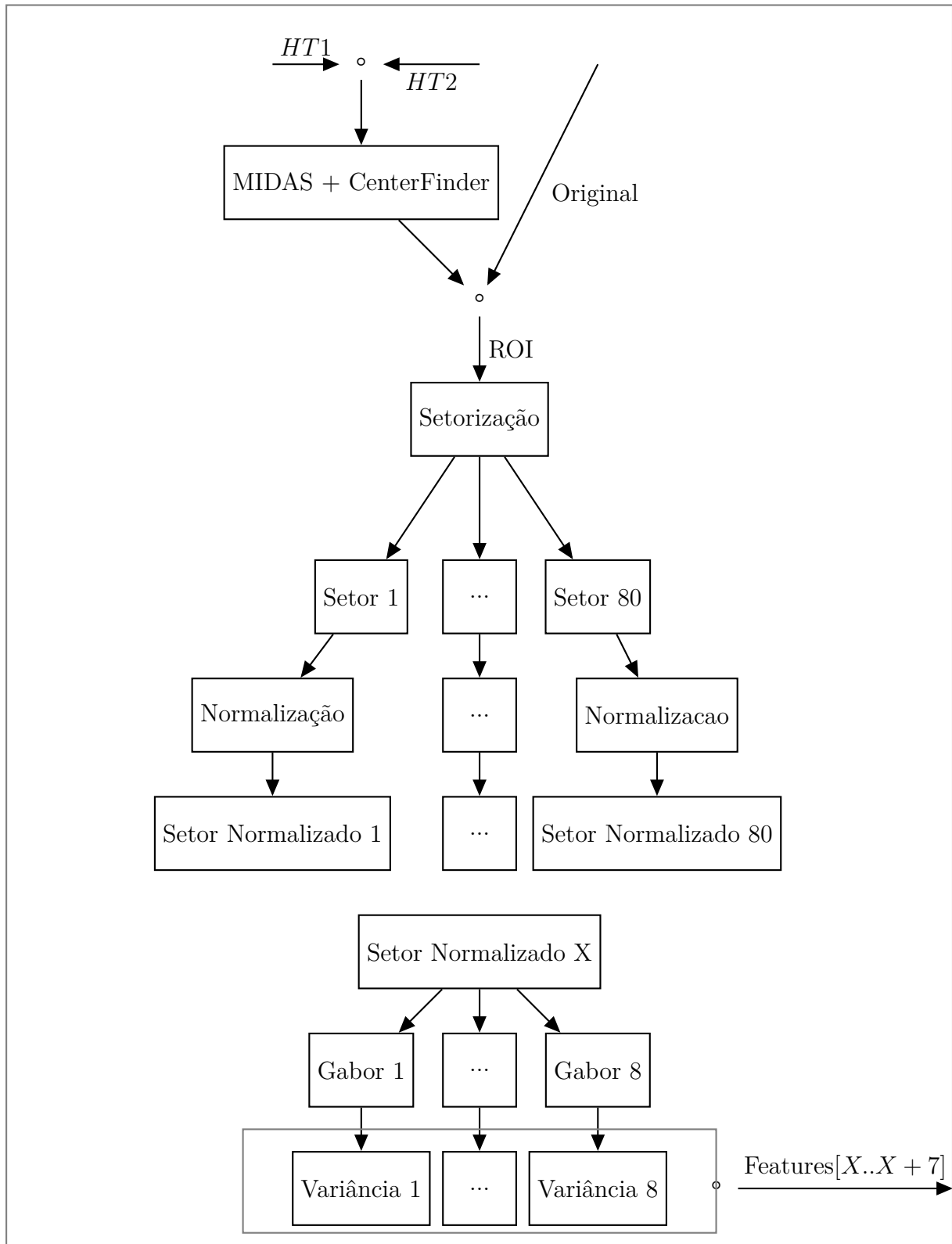


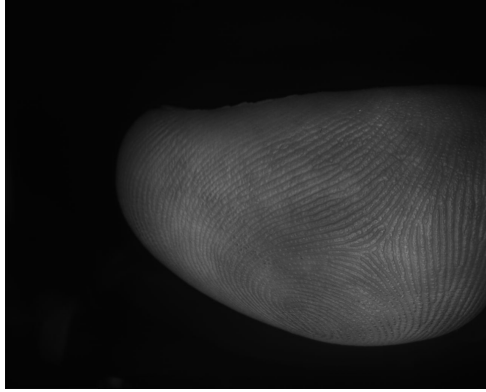
Figura 3.1: Esquemático geral do sistema. As variâncias são as *features*.

A seguir são apresentadas os três principais módulos da implementação com seus respectivos esquemáticos, bem como a explicação detalhada da abordagem utilizada. O principal objetivo é justificar escolhas e garantir a clareza das etapas.

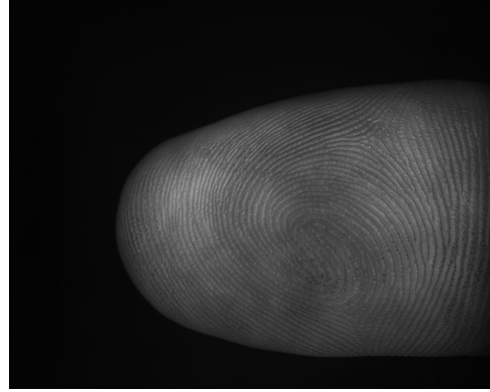
3.2 MIDAS

O programa MIDAS é de código fechado, tendo sido cedido pelos autores para integração nativa a este trabalho, sendo ele o primeiro dos três módulos. O cabeçalho que acompanha seu código fonte original e as informações da patente são disponibilizados no Anexo II.

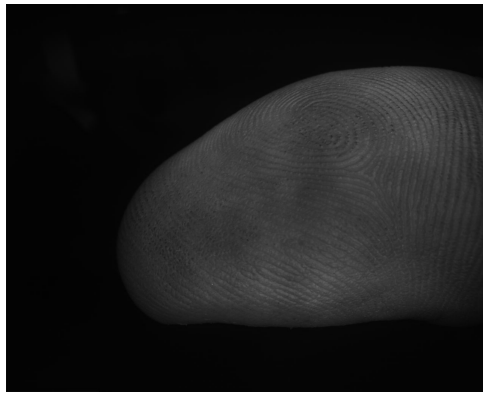
O processo de aquisição do aparelho obtido, desenvolvido pela TBS biometrics, trabalha com três câmeras para captura multivista. Esse aparelho possui um algoritmo, de código fechado, que recebe como entrada uma imagem de cada câmera e retorna como saída algumas imagens dependendo dos desejos do usuário. As três imagens de entrada são apresentadas abaixo:



(a) Polegar (visão -45°)



(b) Polegar (visão 0°)



(c) Polegar (visão 45°)

Figura 3.2: Imagens extraídas diretamente das três câmeras da TBS.

Uma vez que essas entradas representam, em termos de lógica, "pontos de vista" do dedo a -45° , 0° e 45° , esse algoritmo proprietário as combina, de forma a obter diversas imagens de saída. As mesmas, por sua vez, simulam as impressões obtidas por aquisições com toque.

Para esta dissertação, três imagens de saída foram de interesse e possuem em seu nome de arquivo, ao serem geradas, os sufixos *HT1* (Figura 3.3a) e *HT2* (Figura 3.3b) ou nenhum. Portanto, serão referenciadas por esses nomes. As duas últimas serão apresentadas aqui porque servem como *input* para o MIDAS, ao passo que a sem sufixo será denominada *HT0* (Figura 3.20) para manter o padrão e será apresentada na última seção do capítulo.

Finalmente, note que foi necessário o uso do *cjpegb* devido ao formato das imagens geradas diretamente do aparelho de aquisição. A taxa de conversão utilizada foi de 95%.

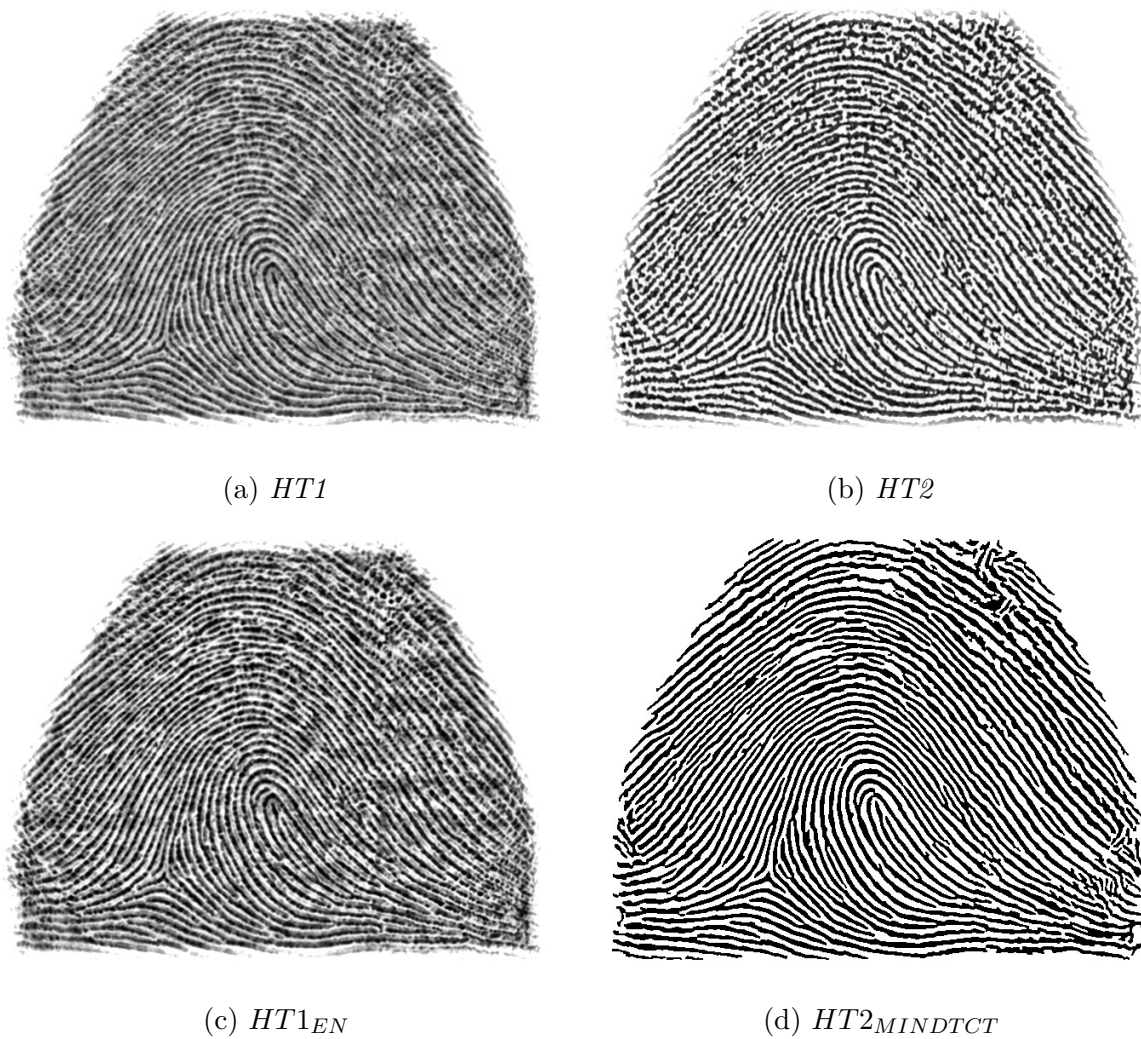


Figura 3.3: Figuras do tipo HT e seus respectivos processamentos iniciais: (a) Tipo $HT1$; (b) Tipo $HT2$; (c) $HT1_{EN}$: equalização de histograma; (d) $HT2_{MINDTCT}$: saída do MINDTCT.

As imagens do tipo $HT2$, como é fácil de observar do exemplo acima, são muito ruidosas. Por esse motivo, a utilização do MINDTCT, reduz esse efeito na imagem. Encontra-se, na 3.3d, um resultado desse procedimento. Ao resultado, dá-se o nome de $HT2_{MINDTCT}$.

Já as imagens do tipo $HT1$ passam por outra abordagem: o realce de contraste. Embora várias possibilidades distintas existam para esse procedimento, foi utilizada a equalização de histograma sem limitações de contraste. Denomina-se $HT1_{EN}$ a saída dessa operação.

Podemos construir uma máscara, sendo ela uma imagem binária, partindo de $HT2_{MINDTCT}$

por intermédio do seguinte algoritmo clássico:

$$B = \begin{cases} B(x, y) = 0, & HT2_{MINDTCT}(x, y) \leq limiar \\ B(x, y) = 1, & HT2_{MINDTCT}(x, y) > limiar \end{cases}$$

A negação dessa máscara, NB , é apresentada a seguir (Figura 3.4):



Figura 3.4: $NB = NOT(B)$.

Se as imagens estiverem representadas em níveis de cinza, sendo 255 o valor máximo permitido e correspondente à cor branca, então

$$HT1_{ENM}(x, y) = HT1_{EN}(x, y) \cdot NB(x, y) + 255 \cdot (1 - NB) \quad (3.1)$$

é a equação que representa a imagem intermediária $HT1_{ENM}$ cujo exemplo pode ser observado na Figura 3.5.



Figura 3.5: Combinação entre HT1 e HT2 com seus respectivos realces.

Então, para que a imagem $HT1_{ENM}$ esteja pronta para a próxima fase, é necessária uma última filtragem, com um passa baixas, diminuindo a sensação empírica de artificialidade, mas que se reflete em termos matemáticos em quase todo tipo de processamento póstumo ao uso do MIDAS. Ao resultado dessa operação foi dado o nome de $HT1_{ENMF}$ e o exemplo equivalente encontra-se na Figura 3.6.

Ainda, é útil ressaltar que essa filtragem passa baixas é feita utilizando a Equação 2.9, tendo nela um *Kernel* gaussiano 5×5 .



Figura 3.6: Resultado do filtro passa baixas sobre $HT1_{ENM}$.

No entanto, como geralmente filtros passa-baixa geram um borramento da imagem e deseja-se manter a nitidez do cume interior, então esse efeito deve ser usado apenas nas bordas. Assim, a imagem gerada neste passo deve ser combinada com a do anterior para produzir o resultado final, processo que será efetuado através da Equação 3.8.

Além disso, a própria imagem NB passa por duas filtrações consecutivas de proces-

samento. A primeira delas é de detecção de bordas, como Sobel, e a outra de filtragem morfológica por dilatação. Seguem os resultados:

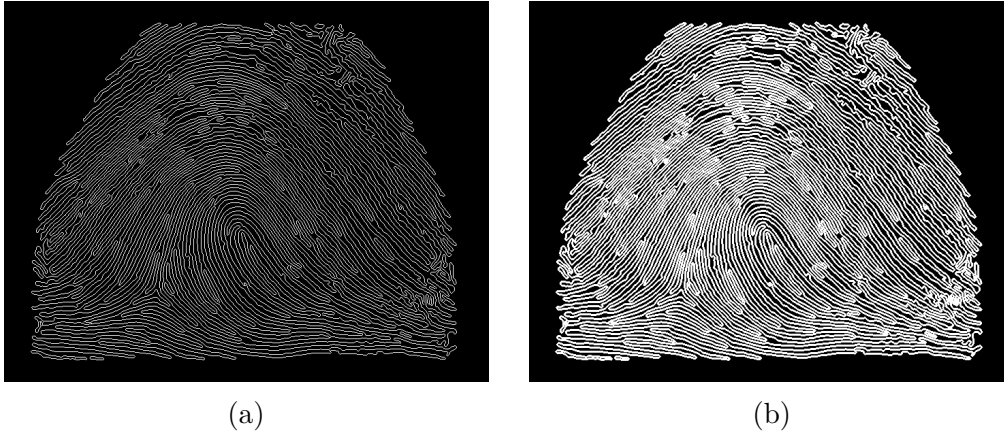


Figura 3.7: Processamento sobre NB: (a) E , resultado do uso do filtro Sobel sobre NB ; (b) E_D , resultado da dilatação sobre E .

É válido reforçar que a imagem E_D da última entre as figuras acima corresponde à dilatação das beiradas, e essa é precisamente a informação utilizada para a produção da equação abaixo cuja necessidade já foi explicada. A Equação 3.8 foi criada com lógica similar à Equação 3.1.

$$HT12 = HT1_{ENMF} \cdot E_D + HT1_{ENM} \cdot (1 - E_D) \quad (3.2)$$

onde os parâmetros (x, y) foram omitidos por legibilidade. Segue a imagem $HT12$ do resultado que, por sua vez, é a saída do módulo MIDAS.



Figura 3.8: Resultado final do MIDAS.

Existem muitas discussões envolvendo a qualidade dos resultados no que diz respeito aos aspectos subjetivos e objetivos, especialmente quando comparados com as entradas do sistema. Embora aprofundar-se nessa discussão possa ser um ato caracterizado como fuga ao escopo, efetivamente é uma declaração utilizada implicitamente para justificar o próximo passo: não só está explicado o porquê de nenhuma das imagens HT_i que não seja HT_{12} foi utilizada, como também é possível declarar que o tema central do trabalho é justificável.

Ora, se não houvesse a necessidade da melhoria na qualidade da imagem proporcionada por essas primeiras etapas, os algoritmos tradicionais de identificação de imagens já utilizados em conjunto com aquisição com toque já seriam suficientes para uso a nível industrial, e portanto este trabalho seria desnecessário.

3.3 Center Finder

O cálculo da textura de uma região é geralmente quantificado pela variância em todas as subregiões de uma área de interesse. Obviamente, para isso é necessário que tal área seja determinada em uma etapa anterior onde o centro dessa região é determinado.

Existem muitas marcas notáveis (*conspicuous landmarks*) que podem ser utilizados como ponto de referência (*reference points*). É recomendável tomar algum que corresponda à curvatura máxima das cristas côncavas (*concave ridges*) [44]. Como o trabalho não é realizado sobre minúcias, regiões de alta curvatura são desejáveis ao invés de serem uma fonte de problemas.

A principal divergência em relação à abordagem adotada por Salil [44] é quanto à descrição textual do método, mas a implementação segue a lógica definida por ele, que a

justifica do seguinte modo:

*"Many previous approaches to determination of a reference point (x_c, y_c) critically relied on the local features like Poincaré index [97] or some other similar properties of the orientation field. While these methods work well for good quality fingerprint images, they fail to correctly localize reference points in poor quality fingerprints with cracks and scars, dry skin, or poor ridge and valley contrast. Recently, Hong and Jain [105] have attempted to judiciously combine the orientation field information with available ridge details for fingerprint classification. However, their method does not reliably handle poor quality fingerprints when the orientation field is very noisy and it can be misled by poor structural cues in the presence of finger cuts and bruises on the skin. [...] propose a new method of reference point determination based on multi-resolution analysis of the orientation fields."*¹

Uma implementação desse novo método proposto foi usada neste trabalho. A seguir são explicados os passos relevantes tomando uma imagem de exemplo e mostrando os resultados de cada uma dessas etapas. Esse algoritmo funciona somente em imagens obtidas por procedimentos de aquisição com contato ou similares a elas, como as geradas pelo MIDAS, mas não serve para imagens obtidas em sistemas biométricos sem toque.

¹Muitas das abordagens anteriores para a determinação de um ponto de referência (x_c, y_c) dependiam criticamente das *features* locais como o índice de Poincaré [97] ou alguma propriedade similar do campo de orientação. Enquanto esse métodos funcionam bem para imagens de boa qualidade de digitais, ele falham em localizar pontos de referência em imagens de baixa qualidade de digitais com rachaduras ou cicatrizes, pele secas ou pobre contraste entre cristas e vales. Recentemente, Hong e Jain [105] conseguiram ajuizadamente combinar a informação do campo de orientação com os detalhes de crista disponíveis para classificação de digitais. No entanto, o método deles não tratam confiavelmente digitais de baixa qualidade quando o campo de orientação é muito ruidoso e pode ser enganado por amostras estruturais pobres na presença de cortes nos dedos e equimoses na pele. [...] é proposto um novo método de determinar o ponto de referência baseada na análise de multi-resolução dos campos de orientação.



Figura 3.9: Imagem resultante da aplicação do MIDAS sobre as entradas HT1 e HT2.

O primeiro passo é uma etapa inicial de preparação da imagem de entrada com a finalidade de tornar possível a extração do *campo de orientação* (orientation field). O resultado dessa sequência de operações é apresentado na Figura 3.10.

Tal etapa de preparação consiste da seguinte sequência de operações:

- A normalização da imagem de entrada P , onde são calculadas a média μ e o desvio padrão σ dos níveis de cinza da imagem e, em seguida, para cada pixel é subtraída tal média do seu nível de cinza e é dividido pelo desvio padrão, nessa ordem:

$$P_2(x, y) = \frac{P(x, y) - \mu}{\sigma}$$

- Então, é gerada uma imagem relacionada ao conceito de desvio padrão sobre P_2 . Para isso, P_2 é seccionada em blocos de um tamanho predefinido - onde todos os resultados desse trabalho foram obtidos usando 16×16 - e o desvio padrão é calculado para cada bloco. Obviamente, se a imagem não tiver uma quantidade de *pixels* múltipla de 16, então uma quantidade de *pixels* deve ser inserida na imagem até que isso ocorra, processo denominado *padding*. A imagem resultante *Desvpadrim* se dá, então, ao substituir todos os valores da região por esse desvio padrão:

$$\forall \text{Bloco } B_i = [16 \cdot i, 16 \cdot (i + 1)] \times [16 \cdot i, 16 \cdot (i + 1)], i \in [0, \frac{|P_2|}{16^2}] \subset \mathbb{N},$$

$$\text{Desvpadrim}(x, y) = \sigma(P(B_i)) \quad \forall (x, y) \in B_i$$

onde $|P_2|$ é a quantidade de elementos de P_2 e σ é a função desvio padrão. Finalmente são descartados *pixels* de *Desvpadrim* até que tenha a mesma dimensão de P_2 .

Dado *Desvpadrim* é gerada uma máscara *Mask* a partir de um *limiar*(threshold) cujo valor - para obtenção dos resultados aqui apresentados - foi tomado como 0.1:

$$Mask = \begin{cases} Mask(x, y) = 0, & P_3(x, y) \leq limiar \\ Mask(x, y) = 255, & P_3(x, y) > limiar \end{cases}$$

- Como última etapa, partindo da máscara *Mask* são calculadas sua média μ_{Mask} e seu desvio padrão σ_{Mask} , de sorte que a imagem desejada *Norm* é gerada de modo similar a como P_2 foi partindo de P :

$$Norm(x, y) = \frac{P_2(x, y) - \mu_{Mask}}{\sigma_{Mask}}$$

onde *Norm* corresponde à imagem normalizada na figura Figura 3.10 e *Mask* à Figura 3.11.



Figura 3.10: Tratamento inicial para obtenção do campo de orientações.



Figura 3.11: Máscara associada.

O *campo de orientação* é, então, obtido partindo da imagem normalizada. Para isso, normalmente são utilizados os filtros de *Marr – Hildreth*, baseado na segunda derivada, ou Sobel, correspondente à primeira derivada. Entretanto, uma possível melhoria pode resultar da criação de um novo filtro com base em uma amostragem estatística. Embora sejam expostos apenas no apêndice, seguem as equações utilizadas por Salil e a implementação equivalente em C++ com OpenCV utilizada para a obtenção dos resultados deste trabalho:

$$\mathcal{V}_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} 2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v) \quad (3.3)$$

$$\mathcal{V}_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} \partial_x^2(u, v) - \partial_y^2(u, v) \quad (3.4)$$

$$\mathcal{O}(i, j) = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\mathcal{V}_y(i, j)}{\mathcal{V}_x(i, j)}\right) \quad (3.5)$$

```
cv::filter2D(normim, Gx, -1, flxMat, cv::Point(-1, -1), 0,
    cv::BORDER_CONSTANT);
cv::filter2D(normim, Gy, -1, flyMat, cv::Point(-1, -1), 0,
    cv::BORDER_CONSTANT);
```

```
Gxx = matProduct( Gx, Gx, METHOD_PRODUCT );
Gxy = matProduct( Gx, Gy, METHOD_PRODUCT );
Gyy = matProduct( Gy, Gy, METHOD_PRODUCT );
```

```

cv::filter2D(Gxx, Gxx, -1, f2Mat, cv::Point(-1, -1), 0,
    cv::BORDER_CONSTANT);
cv::filter2D(Gxy, Gxy, -1, f2Mat, cv::Point(-1, -1), 0,
    cv::BORDER_CONSTANT);
cv::filter2D(Gyy, Gyy, -1, f2Mat, cv::Point(-1, -1), 0,
    cv::BORDER_CONSTANT);
/* Gxy = 2 * Gxy: */
Gxy = bitwiseUpdateImage( Gxy, 2, METHOD_PRODUCT );

matSinCos(Gxx, Gxy, Gyy, &sinTheta, &cosTheta);
cv::filter2D(sinTheta, sinTheta, -1, f3Mat, cv::Point(-1, -1), 0,
    cv::BORDER_CONSTANT);
cv::filter2D(cosTheta, cosTheta, -1, f3Mat, cv::Point(-1, -1), 0,
    cv::BORDER_CONSTANT);

/* Return Theta/2 + Pi/2: */
this->orientim = matAtan2(sinTheta, cosTheta);

```

onde dentre as funções

```

matProduct( A, B, METHOD_PRODUCT );
A = bitwiseUpdateImage( A, 2, METHOD_PRODUCT );
matSinCos(Gxx, Gxy, Gyy, &sinTheta, &cosTheta);

```

as duas primeiras correspondem, respectivamente, às operações $A_2(i, j) = A_1(i, j)B(i, j)$ e a terceira trata-se da extração das componentes senoidais dos filtros recebendo os valores nas variáveis *sinTheta*, *cosTheta*. A variável *orientim* corresponde a imagem $\mathcal{O}(i, j)$ da Equação 3.5 e está representado na figura Figura 3.12. Os núcleos dos filtros das derivadas ∂_x e ∂_y na Equação 3.3 e na Equação 3.4 foram, no código-fonte, substituídas pelas matrizes *f1Mat*, *f1xMat*, *f1yMat* e *f2Mat*.

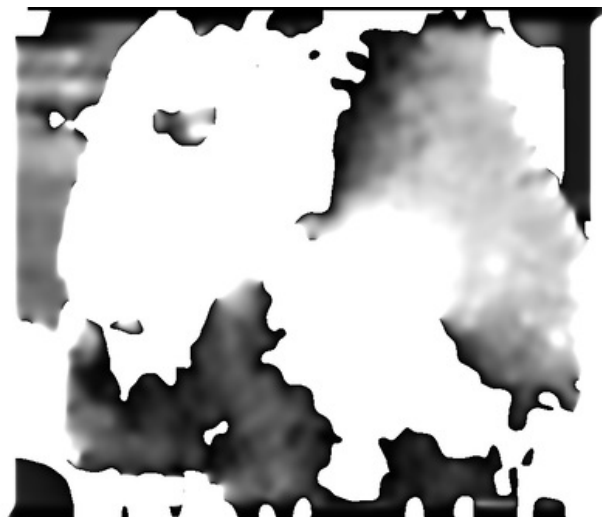


Figura 3.12: Orientação local das cristas.

É possível impor aos usuários, durante o processo de aquisição, regras para cadastramento efetivo no sistema resultando em falha de processamento caso sejam violadas. Isso cria a possibilidade de gerar e validar hipóteses convenientes para o sistema de software biométrico. Uma dessas condições envolve delimitar a região onde o usuário pode colocar o dedo no momento da aquisição da imagem, falhando em caso contrário.

A hipótese resultante dessa regra é a de que o centro da digital, existente caso a digital não seja do tipo arco, está relativamente próximo do centro cartesiano da imagem. Isso se reflete no código fonte em um passo intermediário onde há um *crop* da imagem, procedimento no qual uma imagem menor é obtida ao descartar *pixels* sem nenhum cálculo adicional. Para realizá-lo, é necessário definir uma cota, que pode ser percentual e significa quantos *pixels* são abandonados e, neste trabalho, foi tomada uma cota de 30%.

Embora pareçam ter o mesmo tamanho que as originais devido ao redimensionamento, é fácil notar a perda de informações em cada uma das Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15. É válido ressaltar, ainda, que tal redimensionamento ocorreu apenas no texto, estando ausente na implementação.



Figura 3.13: Operação de *crop* na imagem original.



Figura 3.14: Operação de *crop* na imagem de orientação.

No entanto, antes de realizar tal operação de *crop* na máscara, foram executados alguns passos intermediários. Devido ao próprio procedimento de filtragem onde foi gerada a máscara, as regiões lateral direita e baixo se mantêm brancas com uma largura de 15 pixels e, então, os valores da matriz da máscara são zerados fazendo com que os *pixels* tornem-se pretos.

Em seguida, é realizada uma filtragem morfológica de erosão sobre ela com um *kernel* de 55×55 possuindo todos os valores iguais a 1, valor máximo permitido e equivalente à cor branca. Finalmente, quando a operação de *crop* é realizada a máscara torna-se utilizável para as próximas etapas e o resultado é mostrado na Figura 3.15.



Figura 3.15: Operação de *crop* na máscara.

O campo de orientação deve passar por uma suavização. Uma filtragem no domínio da frequência, do tipo passa baixa, deve ser realizada e que corresponde a um filtro de média 5×5 [44], resultando em um campo de orientação $\mathcal{O}(i, j)$. Em seguida, uma imagem ε é obtida como sendo a componente senoidal sobre o resultado anterior, isso é:

$$\varepsilon = \text{sen}(\mathcal{O}(i, j))$$

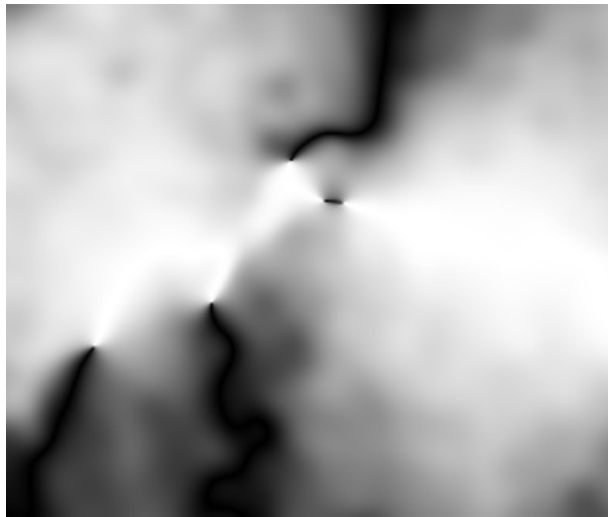


Figura 3.16: Imagem intermediária ε .

Em seguida, valendo-se da detecção de bordas através do Sobel, obtém-se uma imagem possuinte dos candidatos ao centro da impressão digital a menos de ruídos a serem filtrados

na próxima etapa. Salvaguardado o fato de que o OpenCV preenche as bordas inferior e lateral direita da imagem resultante da filtragem com o valor 0, uma vez que não recebem valor pela própria natureza da operação matemática de convolução no *domínio do tempo* ou produto no *domínio da frequência*, é possível prosseguir para a normalização da imagem.

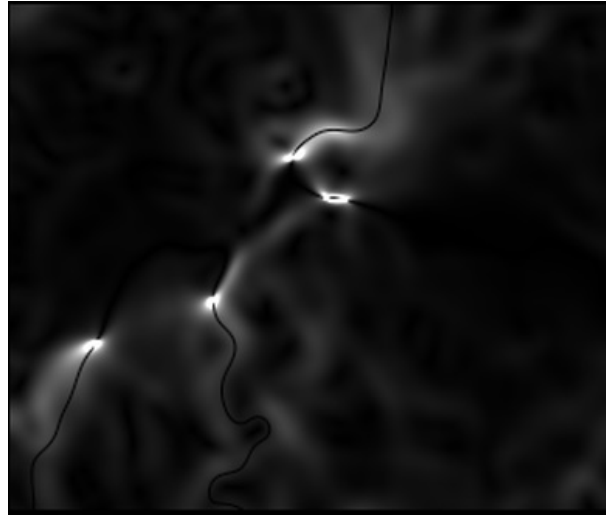


Figura 3.17: Sobel sobre ε .

Denominando o resultado da operação anterior de M , uma normalização é gerada tomando $Mfilter(i, j) = round(255 * (Mfilter(i, j) / max(Mfilter)))$ onde *round* corresponde ao algoritmo da homônima e nativa de arredondamento da linguagem *C/C++* enquanto *max* é a função de valor máximo. Assim, *Mfilter* corresponde a uma imagem de números percentuais inteiros diretamente relacionados aos níveis de cinza. O resultado é mostrado em Figura 3.18.

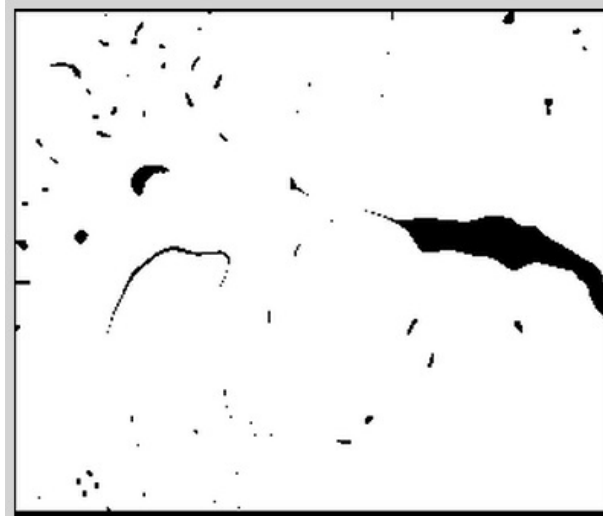


Figura 3.18: Detecção de borda do campo de orientação normalizada.

Faz-se necessário, então, uma limiarização. O procedimento consiste em comparar o valor do nível de cinza de um pixel com um limiar, atribuindo valor mínimo se for menor ou máximo se maior. Caso seja igual, arbitra-se ou o máximo ou o mínimo dependendo da aplicação, sendo esse último viável para o caso atual:

$$Mbin(i, j) = \begin{cases} 0, & Mfilter(i, j) \leq limiar \\ 255, & Mfilter(i, j) > limiar \end{cases}$$

Foi escolhido o limiar de 140 uma vez que valores menores que este são péssimos candidatos. Os pontos brancos correspondem ao nível 255 e o resultado é apresentado:

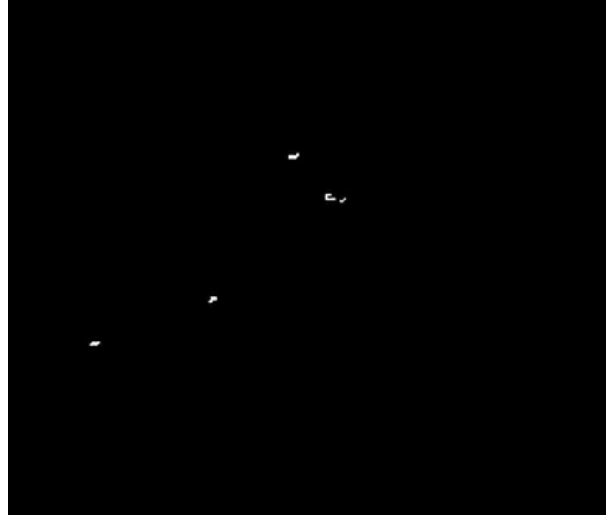


Figura 3.19: Imagem binarizada.

Finalmente, todos os valores não-nulos (brancos) da imagem binarizada acima são candidatos para o centro da imagem. Caso o centro exista, ele sempre está localizado no candidato mais alto, exceto se o mesmo for um ruído. Isso é, se o ponto realmente corresponde à curvatura máxima e está acima de todos os outros, então deve ser o centro da digital e não de um delta ou outro formato. Por esse motivo, convencionou-se tomar as coordenadas (x_c, y_c) correspondentes ao centro procurado como sendo as mesmas coordenadas do ponto branco mais elevado.

É válido a ressalva de que, em imagens muito ruidosas, o algoritmo tende a falhar pois aparecem falsos candidatos nela [44]. Ainda, devido justamente a esse fato o crop torna-se necessário visto que o centro, dadas as condições iniciais de aquisição já explicitadas, não pode localizar-se em qualquer um dos cantos da imagem.

3.4 Cálculo do Desvio Padrão Médio Absoluto

Um dos aspectos mais fundamentais para encontrar informações sobre uma imagem é o atributo escolhido para a análise. O casamento(matching) pode ser feito através de diversas variáveis. A abordagem utilizada para cálculo da textura é baseada na Variância [49, 44].

Uma vez que o centro foi obtido, o foco dos cálculos matemáticos deixam de ser imagens do tipo *HT12* como as obtidas pelo MIDAS e passam a ser imagens do tipo *HT0*. Não só faz-se conveniente reiterar essa informação aqui como também mostrar um exemplo desse tipo de imagem e, ainda, enfatizar que trata-se de uma combinação matemática

efetuada sobre as imagens da Figura 3.2 por intermédio do algoritmo proprietário da TBS Biometrics.

A variância é calculada em cima de cada setor após a utilização do filtro de Gabor

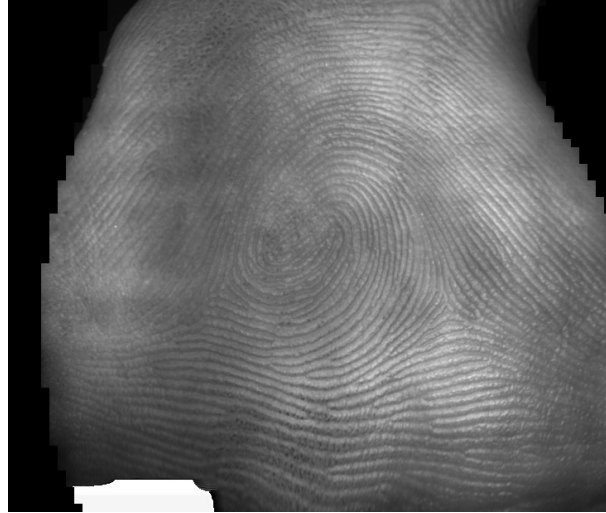


Figura 3.20: Figura tipo HT0..

sobre ele com uma determinada angulação θ . Normalmente a setorização é efetuada seguindo uma sequência de circunferências concêntricas com raios crescentes segundo uma proporção [44, 43]. No entanto, retângulos de mesma área podem ser utilizados porque, contanto que a variância entre imagens parecidas seja próxima, existem vários modos distintos para realizar a escolha do formato da região para fins de identificação.

Antes, porém, da utilização do filtro de Gabor, cada setor deve ser normalizado previamente. A justificativa dada por Salil aplica-se tanto por existir ruído do sensor na imagem, quanto pelas diferenças de luminosidade do fundo, que distorcem os níveis de cinza causando ruído. Em imagens obtidas por rolamento ou pressão isso ocorre devido a diferenças de pressão do dedo. Com adesão à aquisição sem toque, a própria geometria do dedo gerará diferenças de luminosidade devido à profundidade, uma vez que tal dedo não é plano.

Tal normalização é dada pela seguinte equação [44]:

$$N_i(x, y) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{V_0 \cdot (I(x, y) - M_i)^2}{V_i}}, & I(x, y) > M_i \\ M_0 - \sqrt{\frac{V_0 \cdot (I(x, y) - M_i)^2}{V_i}}, & c.c. \end{cases} \quad (3.6)$$

onde M_0 e V_0 são a nova média e a variância desejadas para a região respectivamente. Se feita na imagem inteira, **não irá compensar as diferenças de luminosidade** [44]. Os valores para M_0 e V_0 são determinados empiricamente, sendo recomendados como sendo

iguais a 100, e têm de permanecer o mesmo durante toda a execução do algoritmo de normalização considerando que o objetivo é a eliminação do ruído descrito [44].

Uma vez que a variância, mais especificamente o desvio padrão médio, $V_{i\theta}$ correspondente ao i -ésimo setor no ângulo θ -ésimo, é calculada com a intenção de modelar numericamente a textura, daqui em diante os termos *feature*, *variância* e *desvio padrão médio* serão utilizados de forma intercambiável.

Portanto, o *Vetor de Features* é definido como:

$$\text{Vetor de Features}_{\theta} = \{V_{i\theta}, 1 \leq i \leq i_{max}\} \quad (3.7)$$

Foram escolhidos uma sequência de ângulos θ para a aplicação do filtro de Gabor, especificamente de 0° até 157.5° . Para cada um deles, os outros parâmetros permaneceram fixados em $\sigma = 4.0$, $\lambda = 10.0$, $\gamma = 1$, $\psi = 0$ como sugeriu Salil. Como os setores são de dimensão 30×24 para uma subregião de 240×240 em torno do centro da digital calculado no módulo anterior, segue que $i_{max} = 80$ e, além disso, existem 8 Vetores de Features por dedo.

Possibilidades distintas para verificar a identidade do indivíduo com base nos números dos *vetores de features* existem. Trata-se de um problema de determinar a distância entre eles. A função Distância Euclidiana foi escolhida para representar a diferença entre dois vetores de features gerados para o mesmo ângulo θ . Desse procedimento, 8 valores são gerados e a soma dos mesmos dá a informação final de quão distante um indivíduo está do outro. Sumarizando:

- Tomar uma subregião de, por exemplo, 240×240 na vizinhança do centro calculado na etapa anterior;
- Dividir a imagem em setores retangulares de acordo com algum número predefinido. Aqui, foi escolhido 80, fazendo com que a dimensão de cada setor seja 30×24 ou 24×30 de onde foi escolhida a primeira das opções;
- Seguir o algoritmo de normalização descrito;
- Gerar 8 imagens resultantes da aplicação do filtro de Gabor com ângulo θ fixado para cada uma por setor, o que é equivalente à aplicação do mesmo sobre toda a região de 240×240 ;

- Calcular as features de cada setor. O vetor formado por elas, denominado *Vetor de Features*, é utilizado para a identificação via Distância Euclidiana. Substituindo cada nível de cinza em um setor pelo valor do desvio padrão médio calculado a partir dele, obtemos uma imagem denominada *FingerCode*. Assim, existem 8 FingerCodes por dedo e um exemplo é mostrado no próximo capítulo.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

Foram escolhidas 50 imagens para testar e validar o sistema. 5 amostras para cada um dos dez dedos de um mesmo indivíduo. A abordagem utilizada foi de considerar a comparação de amostras de dedos distintos como se fossem de indivíduos diferentes e amostras do mesmo dedo como se fossem do mesmo indivíduo.

4.1 Resultados

4.1.1 Resultado do MIDAS

O processamento do algoritmo MIDAS, cuja eficiência já era previamente comprovada sob condições ideais não muito estritas, provou-se efetivo em todas as imagens, provendo resultados similares às imagens convencionais de impressões digitais. Isso é válido exceto para entradas muito ruidosas - o que pode ser resolvido previamente por um algoritmo de detecção de mau posicionamento [40] com hipóteses fixadas as quais se manifestam como regras exigidas durante a aquisição.

4.1.2 Resultado do CenterFinder

De 50 imagens utilizadas, com uma taxa de 30% na remoção de bordas foi possível obter, precisamente, 42 centros. Dentre descartar imagens ou marcar manualmente os centros remanescentes para aplicação da próxima etapa foi escolhida a primeira opção. A qualidade do algoritmo deteriorou-se rapidamente ao variar essa cota, de sorte que é o melhor valor com fácil verificabilidade da afirmação.

4.1.3 Resultado das comparações

Dois dedos tiveram três de suas amostras invalidadas e foram descartados da análise enquanto o último dedo teve apenas duas. Assim, objetivando evitar enviesamento estatístico, foram tomadas apenas três amostras de cada um dos 8 dedos remanescentes, de sorte que os centros foram encontrados automaticamente e então os vetores de features foram calculados.

A seguir, são apresentados alguns dos FingerCodes calculados, onde as imagens foram redimensionadas(*resizing*) para 240×240 e são apresentadas aqui com 20% desse tamanho, 48×48 .

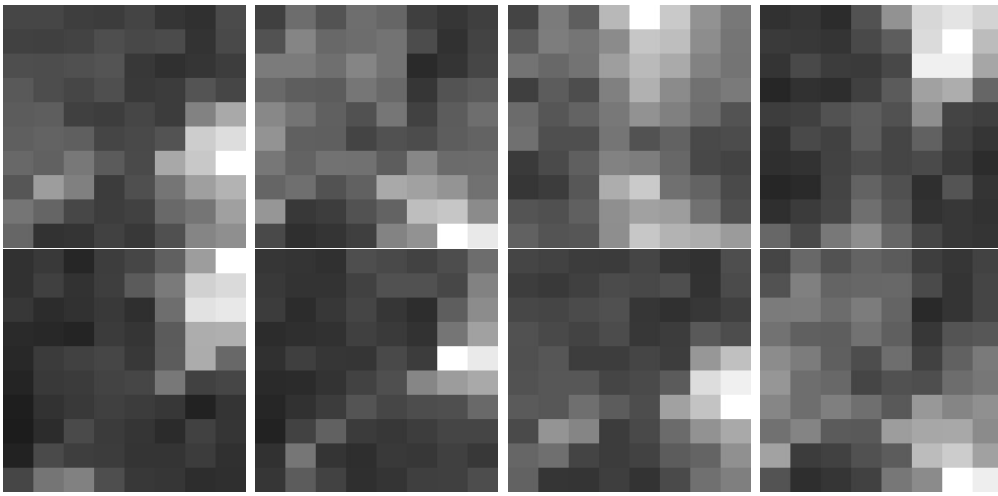


Figura 4.1: FingerCodes $0^\circ - 157.5^\circ$ da esquerda para a direita e de cima para baixo.

As distâncias, considerando que um dedo possua os *Vetores de Features* numerados de um a três, foram calculadas do seguinte modo:

- Distâncias para obter o gráfico de Falso Negativo: $d(Vetor1, Vetor2)$, $d(Vetor1, Vetor3)$, $d(Vetor2, Vetor3)$. Três comparações por dedo para 8 dedos implicam em 24 comparações.
- Distâncias para obter o gráfico de Falso Positivo: $d(Vetor\ n, Vetor\ n + i)$, $n \leq i \leq 7 - n$, onde n é o dedo 1, 2, 3 ou 4. Essa etapa totalizou 22 comparações.

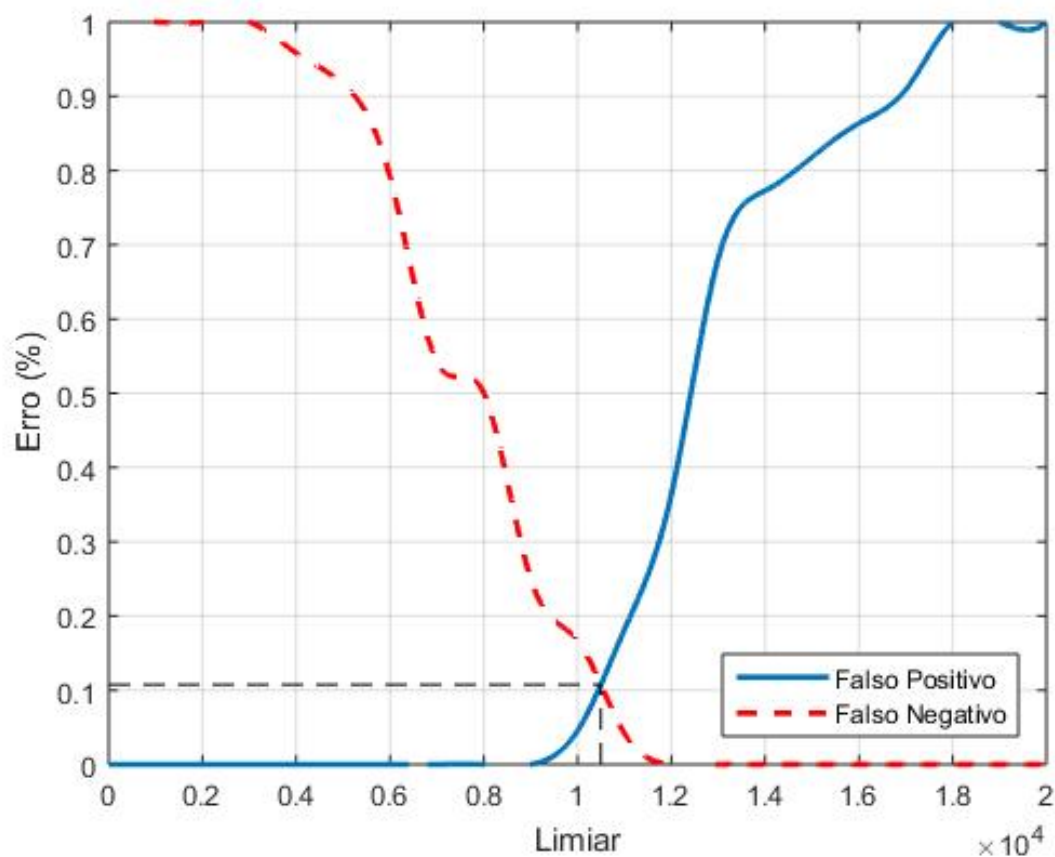


Figura 4.2: Gráfico dos Erros Tipo I e II. O ponto ERR corresponde à interseção dos dois.

Onde o Equal Error Rate(ERR), o ponto em que os gráficos se cruzam, vale 10,74 no *threshold* $1.1 \cdot 10^4$.

Como a quantidade de comparações é próxima, os testes não resultam em enviesamento estatístico. No entanto, a base de dados tornou-se pequena com a triagem, o que é negativo para a confiabilidade do estudo do prisma da estatística.

Ao expressar o Erro Tipo I como função do Erro Tipo II, obtém-se outra curva de interesse cujo acrônimo em inglês é ROC. Sua interpretação revela, de modo mais claro ainda que o ERR, a relação entre os dois tipos de erro estatístico de tal forma que é possível tomar decisões sobre o limiar de acordo com o contexto de aplicação do sistema biométrico, seja ele civil, militar, industrial ou outros.

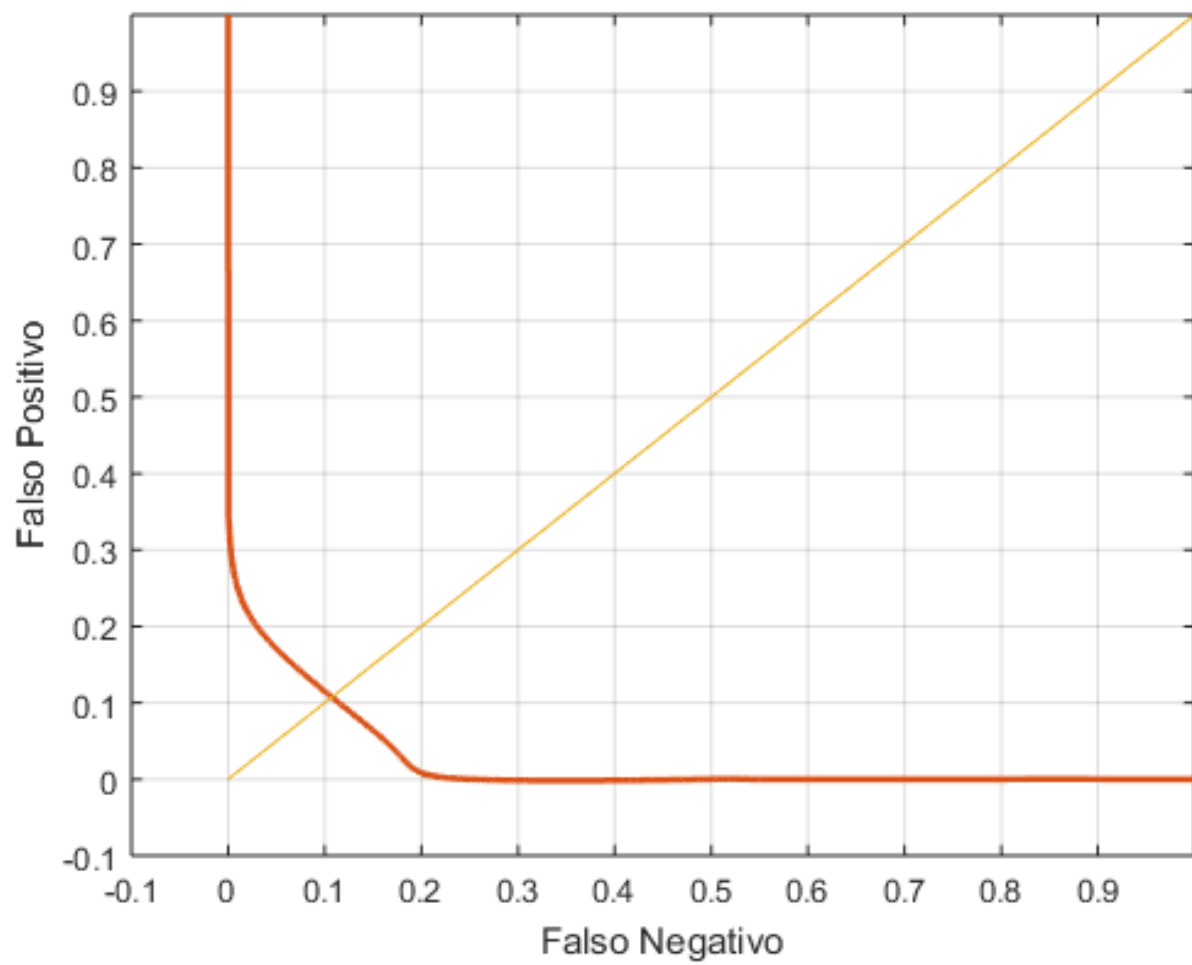


Figura 4.3: Curva *Receiver Operating Characteristic* (ROC)..

Capítulo 5

Conclusão

Foi obtido um *Equal Error Rate*(E.R.R) de 10.74%, suficiente para demonstrar a validade científica dos princípios propostos, mas deixando a desejar para aplicações de larga escala, como civis e industriais. Testes mais amplos podem ser feitos com bancos de dados maiores, bem como ajustes locais nos filtros e parâmetros escolhidos em cada etapa possivelmente irão diminuir essa taxa.

O módulo MIDAS resolve, em qualidade satisfatória, o problema de transformação das entradas, mesmo que o centro não possa ser encontrado *a posteriori* por excesso de ruído, sendo bem sucedido em todas as imagens testadas. Tal ruído degenera a detecção do centro se excessivo, o que não é muito problemático se considerado o fato de que imagens muito degeneradas não poderiam servir para identificação, como no caso de impressões digitais latentes irreconhecíveis. Finalmente, o módulo utilizado para a identificação, que consiste na geração de FingerCodes e na comparação dos mesmos pelo uso da Distância Euclidiana, possui os resultados conforme a previsão feita por Jain [43] e Salil [44].

Ademais, nem todo usuário pode ser identificado de acordo com a metodologia proposta. De fato, conforme o esperado, indivíduos que não possuem centro em suas digitais, como os que têm a digital do tipo *arco*(*arch*), não podem ser identificados e o sistema é capaz de detectar e alertar a ocorrência desses casos. Ou seja, se todos os candidatos para o centro estiverem abaixo do limiar o sistema é capaz de detectar impossibilidade de encontrá-lo.

A não identificação de digitais do tipo arco(*arch*) não é um problema insolucionável. Existem outros métodos de detecção, baseados em minúncias(*minutiae*) que podem ser utilizados. A criação de um módulo para essa tarefa poderia aumentar a quantidade de usuários identificáveis.

Além disso, o espaço amostral para a identificação foi drasticamente reduzido pela metade entre as etapas de busca do centro e de geração dos FingerCodes. Portanto, um dos possíveis trabalhos futuros envolve o incremento do espaço amostral acompanhado de

ajustes locais ao código fonte, se e quando possível.

Além disso, com o trabalho de Zaghetto [40], o sistema poderia ser expandido para compreender a checagem de mau posicionamento, ao passo que o trabalho desenvolvido por Mendelson [4] traz algumas soluções para problemas de fraudes em impressões obtidas com contato. Um módulo final poderia ser adicionado objetivando readaptar essa metodologia de segurança para refletir as novas condições, caso necessário, de modo que estariam compreendidas todas as etapas: desde a aquisição sem contato à detecção de tentativas de acessos irregulares, sendo útil para aplicações diversas aplicações como civis, industriais e militares.

Referências

- [1] D. M. James Wayman, Anil Jain and D. Maio, *Biometric Systems*, vol. 1993. Springer-Verlag, BER, Germany, 2005. 1, 17, 30
- [2] TSE, *Sistema eletrônico de votação: perguntas mais frequentes*, vol. 2. Brasília, TSE, 2015. 2
- [3] P. do Planalto, “Palácio do planalto presidência da república.” 2
- [4] e. a. SILVA, M. M. E., “Detecção de fraudes em leitores de impressões digitais sem contato utilizando descritores de texturas e redes neurais artificiais,” *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, Santarém, Pará*, 2016. 2, 64
- [5] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2006. 4, 5, 6, 9, 13
- [6] A. V. OPPENHEIM, *Sinais e Sistemas, 2 ed.* São Paulo, Rua Nelson Francisco, 26 - Limão: Pearson Education do Brasil, 2010. xi, 4, 6, 7, 9, 14
- [7] E. L. LIMA, *Curso de Análise*, vol. 1, 11 ed. IMPA, 2009. 8, 11
- [8] D. Gabor, “Theory of communication,” 25 de Novembro de 1944. 10
- [9] C. DOSS, “An introduction to lebesgue integral,” 2006. 10
- [10] G. B. THOMAS JR, *Calculus*, vol. 1, 11 ed. Pearson, São Paulo, 2009. 10
- [11] R. H. Risch, *The solution of the problem of integration in finite terms*. Bull. Amer. Math. Soc., 1970. 11
- [12] J. R. M. Gomes and F. S. P. Cardona, “Uma condição necessária e suficiente para integrabilidade de uma função real,” *IV Simpósio de Iniciação Científica e Pós-Graduação do IME-USP*, 2008. 11
- [13] M. Pinteric, “Introduction – opencv 3.0.0-dev documentation.” 15
- [14] F. Galton, “Personal identification and description,” *Nature*, pp. 173–177 – 201–202, 1888, June 21 and 28. 17
- [15] M. M. E. SILVA, A. ZAGHETTO, and C. ZAGHETTO, “Detecção de fraudes em leitores de impressões digitais sem contato utilizando descritores de texturas e redes neurais artificiais,” *A ser publicado nos Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, p. 921–925, 2016. 17

- [16] A. K. Jain, A. Ross, and S. Prabhakar, “An introduction to biometric recognition,” *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 14, pp. 4–20, 2004, January. 17
- [17] e. a. A. Sasse, “Transforming the “weakest link” – a human/computer interaction approach to usable and effective security,” *BT Technology Journal*, vol. 19, pp. 122–131, 2001. 18
- [18] S. Davies, “‘touching big brother’, information technology & people,” vol. 7, p. 38–47, 1994. 18
- [19] V. Belotti, *Design for privacy in multimedia computing and communications environments*, in P. Agre and M. Rotenberg (eds), *Technology and Privacy: The New Landscape*. MIT Press, 1998. 18
- [20] A. Adams, “Users’ perceptions of privacy in multimedia communications, phd thesis,” *University College London*, 2001. 18
- [21] J. E. ORR, *Talking about Machines: An Ethnography of a Modern Job*. Cornell University Press, 1996. 18
- [22] M. Rejman-Greene, *A framework for the development of biometric systems*. Global Projects Group, 2003. 18
- [23] G. D. d. C. CAVALCANTI, *Composição de biometrias para sistemas multimodais de verificação de identidade pessoal*. Recife, Maio, 2005. 19
- [24] B. M. D. V. LOPES, *Modelos Computacionais para Sistemas Automáticos de Identificação de Impressões Digitais*. 2009. 19
- [25] R. J. NODARI-JUNIOR, “Impressões digitais para diagnóstico em saúde: Validação de protótipo de escaneamento informatizado,” 2008. 20
- [26] F. B. DEL VECCHIO and A. GONÇALVES, “Dermatoglifos como indicadores biológicos del rendimiento deportivo,” *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, pp. 38–46, 2011. 20
- [27] D. Ashbaugh, *Ridgeology: Modern Evaluative Friction Ridge Identification*. Royal Canadian Mounted Police, Forensic Identification Support Section. 1989. 20
- [28] V. DEL CONT, *Francis Galton: eugenia e hereditariedade*. 2008. 20
- [29] M. EMIROGLU, I. e AKHAN, “Pré-processing of fingerprint image,” *European Conference on Security and Detection*, 1997. 20
- [30] S. R. Covey, A. R. Merrill, and R. R. Merrill, *Human recognition using biometrics: an overview*, vol. 62. Springer-Verlag, BER, Germany, 2007. 21
- [31] D. e. a. MALTONI, *Handbook of fingerprint recognition*. Springer-Verlag, 2009. xi, 21, 23, 26, 27
- [32] A. T. J. MIZOBUCHI, *Classificação de Impressões Digitais*. 2001. 22

- [33] M. M. E. d. S. SILVA, “Detecção de fraudes em leitores de impressões digitais sem contato utilizando descritores de textura e redes neurais artificiais,” *Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Computação) - Universidade de Brasília. Orientador: Alexandre Zaghetto*, 2015. 25, 27
- [34] G. PARZIALE, *Touchless Fingerprinting Technology*. 2008. 25, 27
- [35] D. L. MILGRAM, “Computer methods for creating photomosaics,” *IEEE Transactions on Computers*, pp. 1113–1119, Nov.1975. 25, 26, 29
- [36] F. S. Antonio, “Flashscan3d.” 28
- [37] N. Corporation, “Nec contactless hybrid finger scanner - hs100.” 28, 29
- [38] T. B. S. A. Switzerland, “Topless biometric systems(tbs).” 29
- [39] P. S. FRANCO, *Método para compatibilidade entre impressões digitais com e sem contato*. 15-Jul-2016, 2014. x, 89 f., il. 29, 34
- [40] e. a. AGUIAR, Luiz Henrique M., “Projeto e implementação de uma rede neural artificial para detecção do mal-posicionamento rotacional de dedos em dispositivos de captura de impressões digitais multivista sem toque,” 2015. 29, 34, 59, 64
- [41] P. Mittal, “Touchless fingerprint system.” 30
- [42] D. E. Knuth and D. Bibby, *The texbook*, vol. 1993. Addison-Wesley Reading, MA, USA, 1986. 32, 33, 34
- [43] e. a. JAIN, Anil K., “Fingercode: A filterbank for fingerprint representation and matching,” *Proc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 1999. 35, 56, 63
- [44] S. PRABHAKAR, *Fingerprint Classification and Matching Using a Filterbank*. 2001. 35, 44, 52, 55, 56, 57, 63
- [45] F. Y. Issam Dagher, Wael Helwe, “Fingerprint recognition using fuzzy artmap neural network architecture,” 2002. 35
- [46] N. A. Adem Alpaslan Altun, “Recognition of fingerprints enhanced by contourlet transform with artificial neural networks,” 2006. 35
- [47] X. T. Lifeng Sha, Feng Zhao, “Improved fingercode for filterbank-based fingerprint matching,” 35
- [48] e. a. Miao-li Wen, “Integration of multiple fingerprint matching algorithms,” 2006. 35
- [49] D. MALTONI, *A tutorial on Fingerprint Recognition*. Springer Berlin Heidelberg, 2003. 55

Anexo I

Filtros usados no CenterFinder

Tabela I.1: Kernels dos filtros $f1$ utilizados.

Filtro $f1$					
0.0003	0.0023	0.0062	0.0062	0.0023	0.0003
0.0023	0.0168	0.0458	0.0458	0.0168	0.0023
0.0062	0.0458	0.1244	0.1244	0.0458	0.0062
0.0062	0.0458	0.1244	0.1244	0.0458	0.0062
0.0023	0.0168	0.0458	0.0458	0.0168	0.0023
0.0003	0.0023	0.0062	0.0062	0.0023	0.0003
Filtro $f1x$					
0.0020	0.0029	0.0020	-0.0020	-0.0029	-0.0020
0.0146	0.0217	0.0145	-0.0145	-0.0217	-0.0146
0.0396	0.0591	0.0393	-0.0393	-0.0591	-0.0396
0.0396	0.0591	0.0393	-0.0393	-0.0591	-0.0396
0.0146	0.0217	0.0145	-0.0145	-0.0217	-0.0146
0.0020	0.0029	0.0020	-0.0020	-0.0029	-0.0020
Filtro $f1y$					
0.00200	0.0146	0.0396	0.0396	0.0146	0.00200
0.00290	0.0217	0.0591	0.0591	0.0217	0.00290
0.00200	0.0145	0.0393	0.0393	0.0145	0.00200
-0.00200	-0.0145	-0.0393	-0.0393	-0.0145	-0.00200
-0.00290	-0.0217	-0.0591	-0.0591	-0.0217	-0.00290
-0.00200	-0.0146	-0.0396	-0.0396	-0.0146	-0.00200

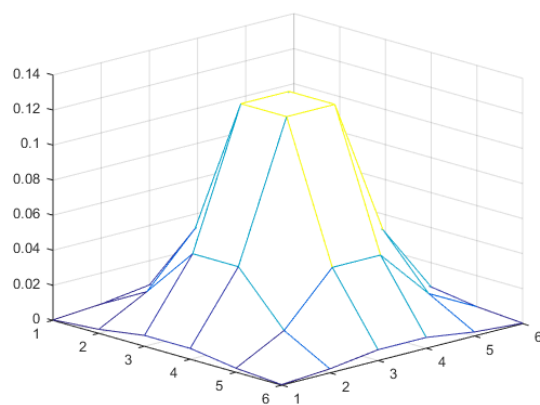


Figura I.1: Filtro $f1$.

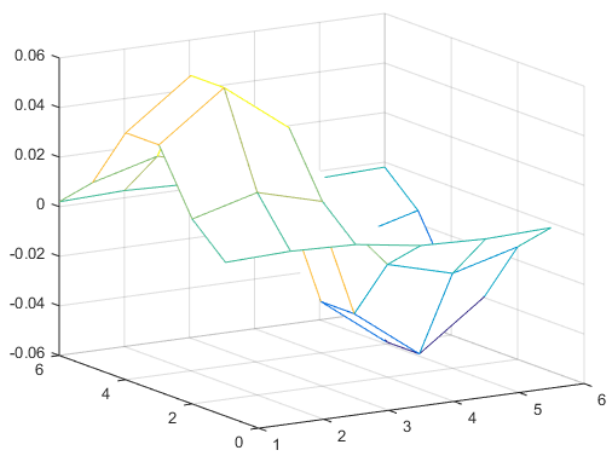


Figura I.2: Filtro $f1x$.

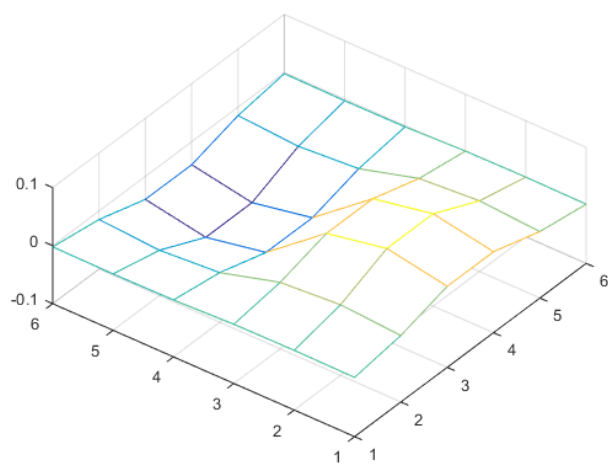


Figura I.3: Filtro $f1y$.

Tabela I.2: Kernel do filtro f_2 de 32×32 .

7.8865e-07	1.4086e-06	2.4171e-06	3.9851e-06	6.3127e-06	9.6077e-06	1.4049e-05	1.9738e-05	2.6644e-05	3.4555e-05	4.3059e-05	5.1551e-05	5.9297e-05	6.5534e-05	6.9586e-05	7.0992e-05	6.9586e-05	6.5534e-05	5.9297e-05	5.1551e-05	4.3059e-05	3.4555e-05	2.6644e-05	1.9738e-05	1.4049e-05	9.6077e-06
1.4086e-06	2.5157e-06	4.317e-06	7.1176e-06	1.1275e-05	1.716e-05	2.5092e-05	3.5253e-05	4.7587e-05	6.1717e-05	7.6905e-05	9.2071e-05	0.00010591	0.00011705	0.00012428	0.00012679	0.00012428	0.00011705	0.00010591	9.2071e-05	7.6905e-05	6.1717e-05	4.7587e-05	3.5253e-05	2.5092e-05	1.716e-05
2.4171e-06	4.317e-06	7.408e-06	1.2214e-05	1.9348e-05	2.9446e-05	4.3059e-05	6.0495e-05	8.166e-05	0.00010591	0.00013197	0.000158	0.00018174	0.00020085	0.00021327	0.00021758	0.00021327	0.00020085	0.00018174	0.000158	0.00013197	0.00010591	8.166e-05	6.0495e-05	4.3059e-05	2.9446e-05
3.9851e-06	7.1176e-06	1.2214e-05	2.0137e-05	3.1899e-05	4.8549e-05	7.0992e-05	9.974e-05	0.00013463	0.00017461	0.00021758	0.00026049	0.00029963	0.00033115	0.00035162	0.00035873	0.00035162	0.00033115	0.00029963	0.00026049	0.00021758	0.00017461	0.00013463	9.974e-05	7.0992e-05	4.8549e-05
6.3127e-06	1.1275e-05	1.9348e-05	3.1899e-05	5.053e-05	7.6905e-05	0.00011246	0.000158	0.00021327	0.0002766	0.00034466	0.00041264	0.00047464	0.00052456	0.000557	0.00056825	0.000557	0.00052456	0.00047464	0.00041264	0.00034466	0.0002766	0.00021327	0.000158	0.00011246	7.6905e-05
9.6077e-06	1.716e-05	2.9446e-05	4.8549e-05	7.6905e-05	0.00011705	0.00017115	0.00024046	0.00032459	0.00042097	0.00052456	0.00062802	0.00072239	0.00079836	0.00084773	0.00086486	0.00084773	0.00079836	0.00072239	0.00062802	0.00052456	0.00042097	0.00032459	0.00024046	0.00017115	0.00011705
1.4049e-05	2.5092e-05	4.3059e-05	7.0992e-05	0.00011246	0.00017115	0.00025028	0.00035162	0.00047464	0.00061558	0.00076706	0.00091834	0.0010563	0.0011674	0.0012396	0.0012647	0.0012396	0.0011674	0.0010563	0.00091834	0.00076706	0.00061558	0.00047464	0.00035162	0.00025028	0.00017115
1.9738e-05	3.5253e-05	6.0495e-05	9.974e-05	0.000158	0.00024046	0.00035162	0.00049401	0.00066685	0.00086486	0.0010777	0.0012902	0.0014841	0.0016402	0.0017416	0.0017768	0.0017416	0.0016402	0.0014841	0.0012902	0.0010777	0.00086486	0.00066685	0.00049401	0.00035162	0.00024046
2.6644e-05	4.7587e-05	8.166e-05	0.00013463	0.00021327	0.00032459	0.00047464	0.00066685	0.00090015	0.0011674	0.0014547	0.0017416	0.0020033	0.002214	0.0023509	0.0023984	0.0023509	0.002214	0.0020033	0.0017416	0.0014547	0.0011674	0.00090015	0.00066685	0.00047464	0.00032459
3.4555e-05	6.1717e-05	0.00010591	0.00017461	0.0002766	0.00042097	0.00061558	0.00086486	0.0011674	0.0015141	0.0018867	0.0022587	0.0025982	0.0028714	0.003049	0.0031106	0.003049	0.0028714	0.0025982	0.0022587	0.0018867	0.0015141	0.0011674	0.00086486	0.00061558	0.00042097
4.3059e-05	7.6905e-05	0.00013197	0.00021758	0.00034466	0.00052456	0.00076706	0.0010777	0.0014547	0.0018867	0.0023509	0.0028146	0.0032375	0.003578	0.0037993	0.003876	0.0037993	0.003578	0.0032375	0.0028146	0.0023509	0.0018867	0.0014547	0.0010777	0.00076706	0.00052456
5.1551e-05	9.2071e-05	0.000158	0.00026049	0.00041264	0.00062802	0.00091834	0.0012902	0.0017416	0.0022587	0.0028146	0.0033697	0.003876	0.0042837	0.0045486	0.0046404	0.0045486	0.0042837	0.003876	0.0033697	0.0028146	0.0022587	0.0017416	0.0012902	0.00091834	0.00062802
5.9297e-05	0.00010591	0.00018174	0.00029963	0.00047464	0.00072239	0.0010563	0.0014841	0.0020033	0.0025982	0.0032375	0.003876	0.0044585	0.0049274	0.0052321	0.0053378	0.0052321	0.0049274	0.0044585	0.003876	0.0032375	0.0025982	0.0020033	0.0014841	0.0010563	0.00072239
6.5534e-05	0.00011705	0.00020085	0.00033115	0.00052456	0.00079836	0.0011674	0.0016402	0.002214	0.0028714	0.003578	0.0042837	0.0049274	0.0054456	0.0057823	0.0058992	0.0057823	0.0054456	0.0049274	0.0042837	0.003578	0.0028714	0.002214	0.0016402	0.0011674	0.00079836
6.9586e-05	0.00012428	0.00021327	0.00035162	0.000557	0.00084773	0.0012396	0.0017416	0.0023509	0.003049	0.0037993	0.0045486	0.0052321	0.0057823	0.0061399	0.0062639	0.0061399	0.0057823	0.0052321	0.0045486	0.0037993	0.003049	0.0023509	0.0017416	0.0012396	0.00084773
7.0992e-05	0.00012679	0.00021758	0.00035873	0.00056825	0.00086486	0.0012647	0.0017768	0.0023984	0.0031106	0.003876	0.0046404	0.0053378	0.0058992	0.0062639	0.0063905	0.0062639	0.0058992	0.0053378	0.0046404	0.003876	0.0031106	0.0023984	0.0017768	0.0012647	0.00086486
6.9586e-05	0.00012428	0.00021327	0.00035162	0.000557	0.00084773	0.0012396	0.0017416	0.0023509	0.003049	0.0037993	0.0045486	0.0052321	0.0057823	0.0061399	0.0062639	0.0061399	0.0057823	0.0052321	0.0045486	0.0037993	0.003049	0.0023509	0.0017416	0.0012396	0.00084773
6.5534e-05	0.00011705	0.00020085	0.00033115	0.00052456	0.00079836	0.0011674	0.0016402	0.002214	0.0028714	0.003578	0.0042837	0.0049274	0.0054456	0.0057823	0.0058992	0.0057823	0.0054456	0.0049274	0.0042837	0.003578	0.0028714	0.002214	0.0016402	0.0011674	0.00079836
5.9297e-05	0.00010591	0.00018174	0.00029963	0.00047464	0.00072239	0.0010563	0.0014841	0.0020033	0.0025982	0.0032375	0.003876	0.0044585	0.0049274	0.0052321	0.0053378	0.0052321	0.0049274	0.0044585	0.003876	0.0032375	0.0025982	0.0020033	0.0014841	0.0010563	0.00072239
5.1551e-05	9.2071e-05	0.000158	0.00026049	0.00041264	0.00062802	0.00091834	0.0012902	0.0017416	0.0022587	0.0028146	0.0033697	0.003876	0.0042837	0.0045486	0.0046404	0.0045486	0.0042837	0.003876	0.0033697	0.0028146	0.0022587	0.0017416	0.0012902	0.00091834	0.00062802
4.3059e-05	7.6905e-05	0.00013197	0.00021758	0.00034466	0.00052456	0.00076706	0.0010777	0.0014547	0.0018867	0.0023509	0.0028146	0.0032375	0.003578	0.0037993	0.003876	0.0037993	0.003578	0.0032375	0.0028146	0.0023509	0.0018867	0.0014547	0.0010777	0.00076706	0.00052456
3.4555e-05	6.1717e-05	0.00010591	0.00017461	0.0002766	0.00042097	0.00061558	0.00086486	0.0011674	0.0015141	0.0018867	0.0022587	0.0025982	0.0028714	0.003049	0.0031106	0.003049	0.0028714	0.0025982	0.0022587	0.0018867	0.0015141	0.0011674	0.00086486	0.00061558	0.00042097
2.6644e-05	4.7587e-05	8.166e-05	0.00013463	0.00021327	0.00032459	0.00047464	0.00066685	0.00090015	0.0011674	0.0014547	0.0017416	0.0020033	0.002214	0.0023509	0.0023984	0.0023509	0.002214	0.0020033	0.0017416	0.0014547	0.0011674	0.00090015	0.00066685	0.00047464	0.00032459
1.9738e-05	3.5253e-05	6.0495e-05	9.974e-05	0.000158	0.00024046	0.00035162	0.00049401	0.00066685	0.00086486	0.0010777	0.0012902	0.0014841	0.0016402	0.0017416	0.0017768	0.0017416	0.0016402	0.0014841	0.0012902	0.0010777	0.00086486	0.00066685	0.00049401	0.00035162	0.00024046
1.4049e-05	2.5092e-05	4.3059e-05	7.0992e-05	0.00011246	0.00017115	0.00025028	0.00035162	0.00047464	0.00061558	0.00076706	0.00091834	0.0010563	0.0011674	0.0012396	0.0012647	0.0012396	0.0011674	0.0010563	0.00091834	0.00076706	0.00061558	0.00047464	0.00035162	0.00025028	0.00017115
9.6077e-06	1.716e-05	2.9446e-05	4.8549e-05	7.6905e-05	0.00011705	0.00017115	0.00024046	0.00032459	0.00042097	0.00052456	0.00062802	0.00072239	0.00079836	0.00084773	0.00086486	0.00084773	0.00079836	0.00072239	0.00062802	0.00052456	0.00042097	0.00032459	0.00024046	0.00017115	0.00011705
6.3127e-06	1.1275e-05	1.9348e-05	3.1899e-05	5.053e-05	7.6905e-05	0.00011246	0.000158	0.00021327	0.0002766	0.00034466	0.00041264	0.00047464	0.00052456	0.000557	0.00056825	0.000557	0.00052456	0.00047464	0.00041264	0.00034466	0.0002766	0.00021327	0.000158	0.00011246	7.6905e-05
3.9851e-06	7.1176e-06	1.2214e-05	2.0137e-05	3.1899e-05	4.8549e-05	7.0992e-05	9.974e-05	0.00013463	0.00017461	0.00021758	0.00026049	0.00029963	0.00033115	0.00035162	0.00035873	0.00035162	0.00033115	0.00029963	0.00026049	0.00021758	0.00017461	0.00013463	9.974e-05	7.0992e-05	4.8549e-05
2.4171e-06	4.317e-06	7.408e-06	1.2214e-05	1.9348e-05	2.9446e-05	4.3059e-05	6.0495e-05	8.166e-05	0.00010591	0.00013197	0.000158	0.00018174	0.00020085	0.00021327	0.00021758	0.00021327	0.00020085	0.00018174	0.000158	0.00013197	0.00010591	8.166e-05	6.0495e-05	4.3059e-05	2.9446e-05
1.4086e-06	2.5157e-06	4.317e-06	7.1176e-06	1.1275e-05	1.716e-05	2.5092e-05	3.5253e-05	4.7587e-05	6.1717e-05	7.6905e-05	9.2071e-05	0.00010591	0.00011705	0.00012428	0.00012679	0.00012428	0.00011705	0.00010591	9.2071e-05	7.6905e-05	6.1717e-05	4.7587e-05	3.5253e-05	2.5092e-05	1.716e-05
7.8865e-07	1.4086e-06	2.4171e-06	3.9851e-06	6.3127e-06	9.6077e-06	1.4049e-05	1.9738e-05	2.6644e-05	3.4555e-05	4.3059e-05	5.1551e-05	5.9297e-05	6.5534e-05	6.9586e-05	7.0992e-05	6.9586e-05	6.5534e-05	5.9297e-05	5.1551e-05	4.3059e-05	3.4555e-05	2.6644e-05	1.9738e-05	1.4049e-05	9.6077e-06

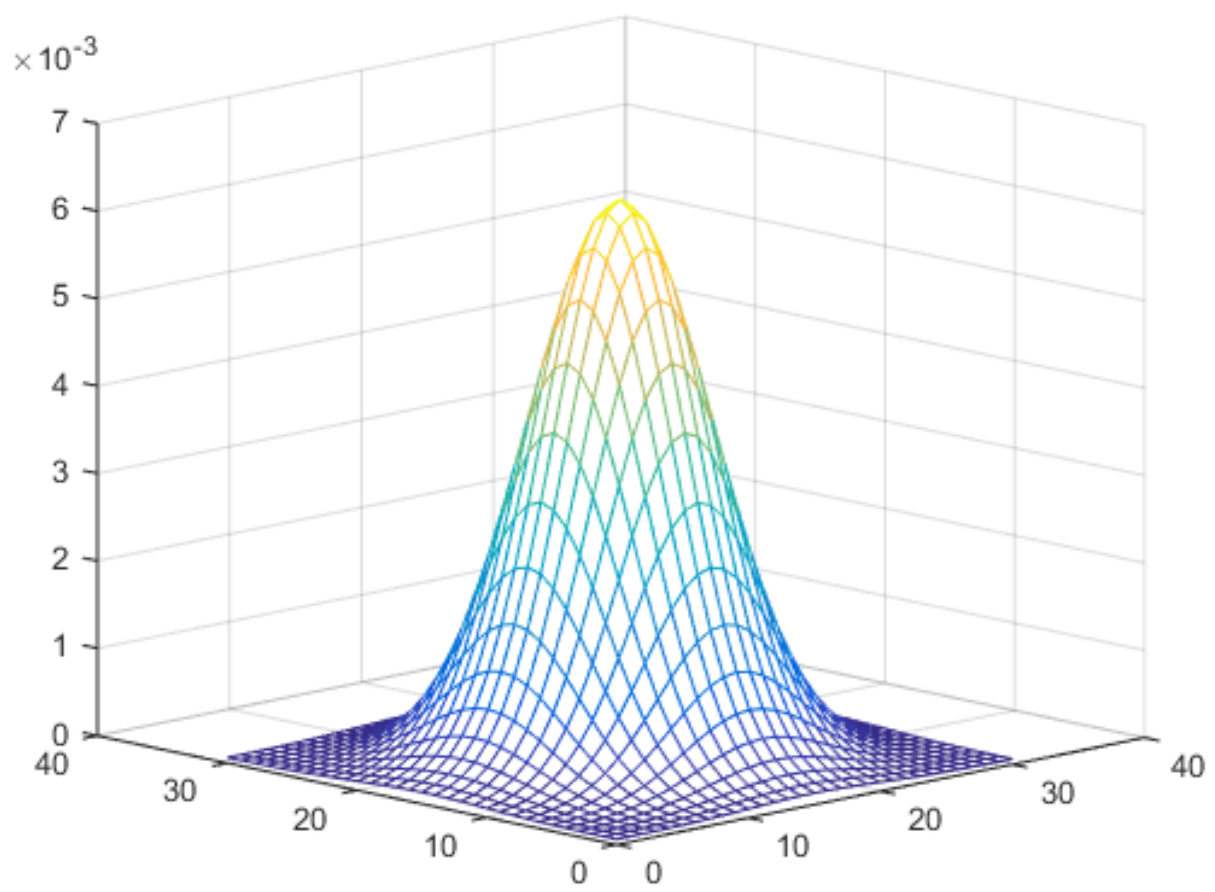


Figura I.4: Filtro f_2 .

Anexo II

Informações MIDAS

```
/*
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Authors: Bruno Macchiavello  bruno@cic.unb.br          %
%           Alexandre Zaghetto  alexandre@cic.unb.br     %
%           Mamede Lima-Marques limamarques@gmail.com    %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Date: 30/11/2010                                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% UnB  - Universidade de Brasília                        %
% IE   - Institute of Exact Sciences                     %
% CIC  - Department of Computer Science                  %
% LISA - Laboratory of Image, Signal and Audio           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CPAI - Centre for Research on Architecture of Information %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
*/
```

- Além disso, do Instituto Nacional da Propriedade Industrial:
- Processo: 12732-1 120
- Título: MIDAS
- Titular: FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
- Criador: ALEXANDRE ZAGHETTO; BRUNO LUIGGI MACCHIAVELLO ESPINOZA; MAMEDE LIMA-MARQUES
- Linguagem: C# (sic)
- Campo de Aplicação: AH-05; AN-02;SV-01
- Tipo de Programa: TC-04
- Data da Criação: 30/11/2010

- Regime de Guarda: Sem sigilo
- Procurador: Não informado ou inexistente